ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



На правах рукописи

Даваасурэн СУМХУУ

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ И ЕЁ ВЛИЯНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ИБР-2М

Специальность 01.04.01— «Приборы и методы экспериментальной физики»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научные руководители: кандидат физико-математических наук ПЕПЕЛЫШЕВ Юрий Николаевич кандидат технических наук ПОПОВ Александр Ксенофонтович

Дубна — 2018

Оглавление

	С	тр.
Введе	ние	4
Глава	1. Импульсный реактор ИБР-2М	8
1.1	Конструкция активного зона и принцип действия	10
1.2	Принцип формирования пульсирующей реактивности	12
1.3	Биологическая защита и теплоноситель реактора ИБР-2М	14
1.4	Предшественники и нереализованные конкуренты реактора ИБР-2	15
1.5	Основные понятие в динамике ядерных реакторов	16
1.6	Изучение динамики импульсного реактора ИБР-2	18
Глава	2. Модель динамики импульсного реактора	
	периодического действия ИБР-2М	22
2.1	Исходные уравнения кинетики	24
2.2	Уравнения кинетики импульсного реактора	28
2.3	Импульсная доля запаздывающих нейтронов	29
2.4	Уравнения МОС импульсного реактора ИБР-2М	31
2.5	Регулируемый параметр реактора ИБР-2М	32
2.6	Структура и уравнения автоматического регулятора	33
2.7	Модель динамики импульсного реактора ИБР-2М	36
2.8	Модель реактиметра импульсного реактора ИБР-2М	44
2.9	Выводы к Главе II	49
Глава	3. Исследование динамики импульсного реактора ИБР-2М	52
3.1	Эксперименты для оценки параметров МОС	52
3.2	Оценка структуры и параметров мощностной обратной связи	
	(MOC)	54
3.3	Частотная передаточная функция обратной связи	55
3.4	Импульсная переходная характеристика МОС	57
3.5	Основные результаты оценки параметров мощностной обратной	
	связи ИБР-2М	61

3.6	Линеаризованные уравнения импульсного реактора.		
	передаточные функции	65	
3.7	Устойчивость импульсного реактора ненулевой мощности	68	
3.8	Устойчивость импульсного реактора с автоматическим		
	регулятором	69	
3.9	Сравнительный анализ динамики импульсных реакторов		
	ИБР-2М и ИБР-2	73	
3.10	Выводы к Главе III	77	
Список сокращений и условных обозначений			
Заключение			
Работы автора по теме диссертации			
Список литературы			
Список рисунков			
Список таблиц			

Введение

Актуальность темы. Создание модели динамики любого реактора крайне важно с точки зрения оценки его безопасности. Создание же модели динамики реактора, у которого нет аналога, важно вдвойне. Исследование динамики реактора ИБР-2М имеет огромное значение для повышения безопасности и надежности работы реактора. Во-первых, это связано с необходимостью анализа поведения реактора в различных аномальных и аварийных ситуациях; во-вторых, для «подсказки» действий оперативному персоналу в различных нетипичных ситуациях; в-третьих, для определения безопасных режимов его работы и определения границ возможных режимов неустойчивости.

Кроме того, эксплуатация импульсного реактора имеет специфическую особенность, поэтому знание переходных процессов является крайне важным для безопасной и надежной работы реактора. С помощью модели динамики можно оценивать: 1) переходные процессы при различных возмущениях, в том числе при нештатных возмущениях; 2) изменение параметров реактора путем сравнения зарегистрированных переходных процессов с процессами, полученными с помощью модели; 3) возможные изменения запаса устойчивости реактора.

Для исследования динамического состояния реактора с помощью модели динамики необходимо, в первую очередь, знание параметров мощностной обратной связи (MOC). Эти параметры определяются только экспериментальным путем, поскольку зависят от уровня мощности и от многих сложных процессов, происходящих в активной зоне.

Модель динамики ИБР-2М включает в себя широкий набор программ для моделирования переходных процессов изменения мощности реактора и вычисления частотных характеристик реактора как системы в целом, так и составляющих его элементов.

Работа выполнена по теме «Развитие реактора ИБР-2М с комплексом криогенных замедлителей нейтронов» (04-4-1105-2011/2019) и направлена на повышение безопасности ИБР-2М.

Цель работы — моделирование и экспериментальное исследование динамики импульсного реактора ИБР-2М периодического действия (модернизированного реактора ИБР-2) в начале эксплуатации (до энерговыработки 1000 МВт сут).

Научная новизна:

Создан вариант модели динамики ИБР-2М для вычисления процессов при быстром изменении реактивности (и, следовательно, мощности) в широком диапазоне. Также на основе модели динамики создана математическая модель реактиметра ИБР-2М. В результате переходных процессов мощности, обусловленных прямоугольными колебаниями реактивности при работе ИБР-2М в режиме саморегулирования, оценены значения параметров МОС, запас устойчивости реактора по амплитуде и фазе при разных уровнях средней мощности, а также запас устойчивости реактора при работе в режиме автоматического регулирования мощности. На основе анализа вычисленных импульсных переходных характеристик и параметров МОС реакторов ИБР-2 и ИБР-2М показано, что при прочих равных условиях оба реактора устойчивы в штатном режиме работы.

Практическая значимость: Научно-практическая ценность работы заключается в том, что была создана модель динамики ИБР-2М, с помощью которой можно моделировать быстрые изменения мощности реактора в широком диапазоне, вплоть до уровня фона, т.е. по времени от 0,2 с и по мощности до 10⁻⁵ от номинальной. Это позволило исследовать различные процессы изменения энергии импульсов, с помощью которых были определены безопасные режимы работы реактора и оптимизированы параметры системы автоматического регулирования мощности. Получены данные по изменению параметров МОС с мощностью и оценено влияние этого процесса на устойчивость реактора. Для реальных шумов реактивности, действующих в реакторе во время его нормальной работы, получены оценки границ колебательной неустойчивости ИБР-2М. Показано, что ИБР-2 и ИБР-2М реактора устойчивы к возмущениям реактивности. Разработанная модель динамики позволяет оценить поведение реактора не только в штатном режиме его работы, но и в различных аварийных ситуациях и анормальных переходных режимах. В целом все вышеуказанное повышает безопасность ИБР-2М.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Создание новой модели динамики ИБР-2М при быстром изменении мощности в широком диапазоне с помощью программы МАТЛАБ.
- Тестирование модели с помощью сравнения вычисленных переходных процессов для ИБР-2 и ИБР-2М с зарегистрированными.

- Создание модели реактиметра для получения реальных шумов реактивности из зарегистрированных амплитуд импульсов мощности.
- Обработка экспериментов по оценке параметров мощностной обратной связи, влияющей на безопасность реактора ИБР-2М.
- Оценка параметров мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2М.
- Оценка запаса устойчивости ИБР-2М при разных уровнях средней мощности в режимах саморегулирования и автоматического регулирования мощности.
- Сравнение динамики импульсных реакторов ИБР-2 и ИБР-2М.

Достоверность: Результаты исследования, вошедшие в данную диссертационную работу были, представлены автором на следующих научных мероприятиях:

- XVII научная конференция молодых ученых и специалистов (ОМУС-2013). МО, Дубна, 8-12 апреля 2013.
- International Conference «Mathematical Modeling and Computational Physics 2013». Dubna, Moscow reg. Russia, 8-12 July 2013.
- XVIII Международная научная конференция молодых ученых и специалистов (ОМУС-2014). МО, Дубна, 24-28 февраля 2014.
- Международная молодёжная конференция «Современные проблемы прикладной математики и информатики». МО, Дубна, 25-29 августа 2014.
- XIX Международная научная конференция молодых ученых и специалистов (ОМУС-2015). МО, Дубна, 16-20 февраля 2015.
- International Conference on Research Reactors: Safe Management and Effective Utilization. IAEA Headquarters in Vienna, Austria, 16-20 November 2015.
- The 6th International Conference on Contemporary Physics (ICCP-VI).
 Ulaanbaatar, Mongolia, 7-10 June 2016.
- International Conference on Mathematics & Computational Methods
 Applied to Nuclear Science & Engineering. Jeju, Korea, 16-20 April 2017.
- VI ежегодную конференцию молодых ученых и специалистов «Алушта-2017». Алушта, Республика Крым, 12-19 июня 2017.
- International Conference «Mathematical Modeling and Computational Physics, 2017». Dubna, Moscow reg. Russia, 3-7 July 2017.

 International Conference on Developments and Application of Nuclear Technologies. Krakow, Poland, 10-13 September 2017.

Личный вклад. Основные результаты, изложенные в диссертации, получены при непосредственном участии автора. Автор диссертации выполнял работы по созданию программ для модели динамики, по обработке и анализу данных экспериментальных исследований, проводил оценку параметров мощностной обратной связи. Автор участвовал в обсуждении и разработке моделей динамики реактора и реализации решений их программного обеспечения (МАТЛАБ). Это отражено в теоретической части диссертации. Также автор выполнял моделирование переходных процессов при быстром изменении реактивности в широком диапазоне, моделирование реактиметра и проводил оценку запаса устойчивости реактора.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликовано 6 научных статьи в реферируемых международных журналах, 1 препринта, а также 5 тезисов в сборниках научных трудов различных международных конференций (в том числе в реферируемых научных журналах).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 96 страниц, включая 43 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 56 наименование.

Глава 1. Импульсный реактор ИБР-2М

Исследовательские реакторы занимают особое место в мировом использовании энергии процесса деления радиоактивных веществ. Основное отличие их от энергетических реакторов состоит в том, чтобы при минимальном тепловыделении получить максимально возможный поток нейтронов. В настоящее время исследовательские реакторы являются основным источником нейтронов, применяемым для проведения фундаментальных теоретических исследований в физике элементарных частиц, ядерной физики, физики твердого тела, а также для решения прикладных задач в материаловедении, медицине, технологии элементов ядерных реакторов и т.д. По данным МАГАТЭ в настоящее время в мире насчитывается 224 действующих исследовательских реакторов, 53 из них находятся на территории России [1]. Из них самый мощный импульсный реактор ИБР-2М успешно работает в ОИЯИ в г. Дубне.

Импульсный реактор ИБР-2 является уникальным импульсный источник нейтронов и по принципу работы [2], и по конструкции, что требует повышенного внимания к его динамике. Модернизированный реактор ИБР-2М является последующей версией реактора ИБР-2, пущенного в эксплуатацию в 1984 г и остановленного в 2006 г в связи с выработкой ресурса [3] [4]. 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 (г. Обнинск) [5].

В период с 1965 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 [6], [7]. Первый импульсный реактора периодического действия ИБР был пущен в эксплуатацию в Дубне в 1960 г. при средней мощности 1 кВт [8]. В дальнейшем его средняя мощность была доведена до 6 кВт. После реконструкции реактора ИБР (1969 г.) его средняя мощность достигала 25 кВт. Реконструированный ректор получил название ИБР-30. Пульсация реактивности в реакторах ИБР и ИБР-30 достигалась с помощью подвижной части активной зоны. В процессе проектирования реактора ИБР-2 планировалась его работа и в режиме бустера с мощным электронным ускорителем [9].

Обширные сведения по импульсным реакторам как непериодического, так, в основном, и периодического действия, включая проектные материалы, относящиеся к реактору ИБР-2, представлены в книге Е.П. Шабалина [10]. К числу важнейших задач, решаемых при эксплуатации импульсных реакторов, относятся контроль, управление и обеспечение, и их безопасной работы. Для обеспечения защитных функций, осуществления управления и контроля во всех режимах работы реакторной установки принята мировая практика использования систем управления и защиты (СУЗ).

Модернизированный реактор ИБР-2 (ИБР-2М) по сравнению с реактором ИБР-2 имеет существенные особенности. Во-первых, более компактная активная зона, рассчитанная на загрузку 69 тепловыделяющих сборок (ТВС) вместо 78 ТВС для реактора ИБР-2 и, как следствие, снижение массы загружаемого топлива (PuO₂). Во-вторых, использование в качестве топливной загрузки только втулочных тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), в которых топливные таблетки имеют центральные осевые отверстия, что позволяет увеличить глубину выгорания до 9%, т.е. почти 1,5 раза в сравнении с ИБР-2. Это те основные изменения реактора, которые могут повлиять на его динамику.

ИБР-2М является уникальным по принципу действия, по конструкции, по параметрам. Реактор генерирует узкие импульсы мощности с периодом $T_{\mu} = 0,2$ с. Амплитуды импульсов мощности P_m почти на три порядка больше средней мощности за период P^0 ($P^0 = 2$ MBT, $P_m = 1890$ MBT). Кассета (TBC) высотой по топливу 445 мм набрана из шестигранных семитвэльных тепловыделяющих сборок; ёмкость корзины активной зоны 69 TBC; топливом служат таблетки втулочного типа из PuO₂. Его основные параметры даны в табл. 1.

Импульсный реактор подвержен существенным возмущениям реактивности и очень чувствителен к этим возмущениям. Флуктуации амплитуд импульсов мощности достигают $\pm 40\%$ в режиме стабилизации (для сравнения: флуктуации мощности стационарного реактора с урановым топливом в 20 раз меньше). Аварийная защита срабатывает при отклонении средней мощности на $\pm 20\%$, а также при отклонении амплитуды импульса мощности на +100 и -50%от заданных значений. При срабатывании аварийной защиты реактивность за 0,2 с уменьшается так, что следующий импульс мощности не возникает.

Характеристика	Значение			
Средняя тепловая мощность реактора	2 MBт			
Мощность в импульсе	1830 МВт			
Мощность между импульсами	0,2 МВт			
Длительность импульса мощности на половине высо-	200 мкс			
ТЫ				
Частота импульсов мощности	$5 c^{-1}$			
Ядерное топливо	PuO ₂ – 83,9 кг			
Обогащение	95% (по Ри-239)			
Объем активной зоны	19,5 л			
Теплоноситель	жидкий натрий			
Отражатели	вольфрам, сталь			
Глубина модуляции реактивности	$3,5 \cdot 10^{-2}$			
Нагрев двуокиси плутония за один импульс в макси-	20 K			
муме тепловыделения				
Равновесная импульсная надкритичность	$1,1 \cdot 10^{-3} \mathrm{K_{s d \phi d}}$			
Эффективность аварийной защиты	$2,1 \cdot 10^{-2} \mathrm{K_{s \phi \phi}}$			

Таблица 1 — Основные параметры и характеристики ИБР-2М

По сравнению со стационарным реактором режим работы импульсного реактора можно назвать экстремальным. В связи с этим динамика конкретного импульсного реактора представляет несомненный интерес.

1.1 Конструкция активного зона и принцип действия

Активная зона имеет форму вертикальной шестигранной призмы. Все грани призмы кроме одной окружены отражателями, которые могут перемещаться в вертикальном направлении, в той или иной степени приоткрывая активную зону и, тем самым, изменяя плотность нейтронов в активной зоне вследствие изменения утечки нейтронов из нее. Эти отражатели играют роль органов управления и защиты: компенсирующих органов, автоматического регулятора, промежуточного регулятора и аварийной защиты, обеспечивающей прекращение цепной реакции (Puc.1.1).

Компенсирующий орган (KO): Компенсирующие органы компенсируют выгорание топлива и отрицательную реактивность обратной связи, обусловленную разогревом реактора. Два компенсирующих органа (KO1, KO2),



Рисунок 1.1 — Поперечный разрез активной зоны реактора ИБР-2М: 1 – блоки аварийной защиты; 2 – блоки первого и второго компенсирующих органов; 3 – блок промежуточного регулятора; 4 – стержень автоматического регулятора; 5 – матрица стационарного отражателя; 6 – кожух подвижного отражателя; 7 – водяные гребенчатые замедлители; 8 – внешний нейтронный источник; 9 – основной подвижный отражатель; 10 – дополнительный подвижный отражатель; 11 – водяной плоский замедлитель

эффективность КО-1, КО-2. Скорость перемещения блоков – малая 0,19 мм/с, большая – 0,79 мм/с, аварийная – 3 мм/с. По условиям ядерной безопасности, для перемещения органов КО необходимо периодически давать команду на движение. Одна команда действует в течение 4 сек. За это время блок КО перемещаются, при малой скорости на 0,78 мм, при большой скорости на 3,18 мм. При команде на сброс, привод гонит КО вниз со скоростью 20 мм/с. При аварийном отключении питания шаговых двигателей органы КО за первые 100 мсек падают на 20 мм, за 200 мсек на 70 мм. Усилие, развиваемое приводом КО не менее 90 кг. Вес рабочего органа КО 62 кг.

Автоматический регулятор (AP): АР поддерживает мощность на заданном уровне. АР предназначен для автоматического поддержания мощности. Скорость перемещения 16,7 мм/с. При сбросе, аварийная скорость (вниз) 16,7 мм/с. Усилие, развиваемое приводом АР не менее 12 кг. Вес стержня АР 400 гр.

Промежуточный регулятор – **Ручной регулятор** (**ПР**): Промежуточный регулятор включается оператором для компенсации медленных уходов реактивности с тем, чтобы автоматический регулятор не выходил из своей средней

зоны, где его реактивность зависит от перемещения практически линейно. ПР предназначен для плавного изменения реактивности, скорость перемещения 0,79 мм/с. Также, как и KO, по условиям ядерной безопасности, органы ПР должны перемещается периодически (время отработки команды 7 сек). При одной команде, орган ПР перемещается на 5,56 мм в течении 7 сек. По команде на сброс, привод гонит орган ПР вниз со скоростью 3 мм/с. При обесточены привода, орган ПР падает со скоростью 20 мм/с до высоты 60 мм. Далее, ввиду малого веса ПР (10 кг), он не может переоделась сопротивление пружины пневмотормоза.

Аварийная защита (A3): По команде на сброс, за первые 100 мсек блоки A3 должны уйти от зоны не менее чем на 70 мм. По результатам испытаний на штатном месте, за первые 100 мсек, ход A3 не менее 80 мм. За 200 мсек, ход не менее 210 мм. При аварийном отключении питания шагового двигателя привода A3, под воздействуем ускоряющей пружины, орган A3 за первые 100 мсек падает на 45 мм, за 200 мсек на 156 мм. Максимальное усилие на штанге развиваемое приводом A3 не менее 75 кг. Вес рабочего органа A3 35 кг.

1.2 Принцип формирования пульсирующей реактивности

Мимо свободной грани проходит подвижный отражатель, который состоит из двух стальных лопастей (см. рис. 1.2). Лопасти вращаются в противоположные стороны с разными скоростями в кожухе, заполненном гелием. Скорость основного подвижного отражателя 600 об/мин, дополнительного – 300 об/мин.

Когда лопасти проходят мимо активной зоны одновременно, создается импульс реактивности. В штатном режиме положение органов управления таково, что реактор в течение ~ 400 мкс находятся в надкритическом состоянии на мгновенных нейтронах. В течение этого времени происходит стремительный рост мощности. Когда лопасти отходят от активной зоны реактивность резко уменьшается, реактор становится глубоко подкритическим, мощность реактора стремительно падает (см. рис. 1.3).

Эффективность подвижного отражателя $\Delta k_{\Pi O}$ (т.е. обусловленное подвижным отражателем изменение реактивности от максимума до минимума) очень большая (до модернизации реактора $\Delta k_{\Pi O} = 0.025$, сейчас $\Delta k_{\Pi O} = 0.03$,



Рисунок 1.2 — Активная зона реактора ИБР-2М: 1 – активная зона; 2 – дополнительный подвижный отражатель; 3 – основной подвижный отражатель; 4 – корпус реактора; 5 – стационарный отражатель; 6 – водяной замедлитель



Рисунок 1.3 — Импульс мощности и верхняя часть импульса реактивности на мгновенных нейтронах: P – мощности, ε – реактивность, $E_{\rm u}$ – энергия импульса мощности, t – время, $t^+ \div t^-$ – интервал надкритичности, ε_m – максимальное значение реактивности на мгновенных нейтронах

т.е. 3%). Поэтому между импульсами мощности состояние реактора глубоко подкритическое. При прохождении мимо активной зоны только основного подвижного отражателя создаются побочные импульсы реактивности малой амплитуды, не оказывающие существенного влияния на работу реактора (реактор остается глубоко подкритическим). В результате реактор генерирует очень узкие импульсы мощности. Ширина импульса мощности на половине высоты равна ~250 мкс, период же импульсов равен 0,2 с. Поэтому при моделировании импульсы мощности удобно полагать идеальными (бесконечно узкими). Амплитуды импульсов мощности превышают среднюю мощность реактора почти на три порядка, мощность между импульсами (мощность фона) на порядок меньше средней мощности (рис. 1.4). В импульсах мощности выделяется 92% генерируемой реактором энергии, между импульсами лишь 8%.



Рисунок 1.4 — Изменение реактивности на мгновенных нейтронах и мощности между соседними импульсами мощности: ε – реактивность в абсолютных единицах; P – мощность в MBт; t – время в мс

1.3 Биологическая защита и теплоноситель реактора ИБР-2М

Реактор окружен радиационной биологической защитой, состоящей из двух слоев общей толщиной 4 м и содержащей железо с карбидом бора и тяжелый бетон. В защите поглощаются гамма кванты, замедляются быстрые нейтроны и поглощаются замедленные. Схема охлаждения активной зоны реактора 3-х контурная, двух петлевая (см. рис. 1.5). Натрий первого контура непосредственно протекает в корпусе реактора (1) и снимает тепло с твэлов. Натрий второго контура (не радиоактивный) через промежуточные теплообменники (4а) и (4б) охлаждает натрий первого контура и передает тепло атмосферному воздуху в воздушных теплообменниках (6а) и (6б). Циркуляция натрия по петлям 1-го и 2-го контуров обеспечивается электромагнитными насосами (3а) и (3б). Толщу бетонной биологической защиты пронизывают каналы



Рисунок 1.5 — Схема натриевого охлаждения реактора ИБР-2М

для пролета нейтронов к экспериментальным исследовательским приборам на пучках – спектрометрам по времени пролета нейтронов. Реактор ИБР-2М называется реактором на быстрых нейтронах, потому что деления ядер в активной зоне происходят под действием только быстрых нейтронов деления (необходимость этого объясняется ниже, в части физики реактора). Но все методики исследования структуры и динамики веществ, для которых создан ИБР-2М, основаны на использовании тепловых (замедленных) нейтронов, поэтому за отражателем реактора находятся замедлители нейтронов, в простейшем случае –это кюветы с дистиллированной водой.

1.4 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 (г. Обнинск) и импульсных реакторов периодического действия небольшой мощности ИБР и ИБР-30. Теория импульсных реакторов периодического действия была впервые разработана в Физико-энергетическом институте (г. Обнинск) [5]. Первый импульсный реактора периодического действия ИБР был пущен в эксплуатацию в Дубне в 1960 г. при средней мощности 1 кВт [11]. В дальнейшем его средняя мощность была доведена до 6 кВт. После реконструкции реактора ИБР (1969 г.) его средняя мощность достигала 25 кВт. Реконструированный ректор 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 годов были предприняты попытки создания мощных импульсных реакторов. Наиболее продвинутым оказался проект стран Евратома – проект реактора SORA (Испра, Италия), первое упоминание о котором появилось в 1964 г. [12], 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).

1.5 Основные понятие в динамике ядерных реакторов

Основные понятия в динамике ядерных реакторов, общие для всех типов реакторов, – это реактивность, время жизни нейтронов и запаздывающие нейтронов [14-19]. Реактивность есть отклонение эффективного коэффициента размножения нейтронов k от единицы, отнесенное к k. Реактивность является интегральной характеристикой всего реактора. Экспериментальные значения реактивности получает обычно из наблюдений динамического поведения реактора, хотя возможны и статические измерения коэффициента размножения нейтронов. Точечная модель реактора применима только тогда, k очень близок к единице (когда реактор не очень далек от критического состояния), что, к счастью, охватывает широкий набор практически важных случаев. Реактивность зависит от размера реактора, относительных количеств и плотностей различных материалов и от нейтронных сечений рассеяния, поглощения и деления. Поскольку на все это влияют изменение температуры, давления и другие процессы, происходящие из-за деления ядер, реактивность зависит от предыстории работы реактора. Вычисление этой «обратной связи по реактивности» - одна из центральных проблем динамики реакторов [17]. Уравнения динамики обычно нелинейные, так как содержат произведение реактивности на мгновенное значение мощности. Время жизни поколения нейтронов есть среднее

время, необходимое для воспроизводства нейтронов в размножающей сборке. Оно может быть очень коротким (10^{-8} сек) в реакторах на быстрых нейтронах, где деление вызывают быстрые нейтроны, или более длительным (10⁻³) сек) в реакторах на тепловых, где нейтроны прежде чем вызвать деление, сильно замедляется, а затем диффундируют при тепловых энергиях. Запаздывающие нейтроны, хотя и составляют менее одного процента выхода нейтронов при делении, чрезвычайно важны, так как определяют в динамике реакторов характерное время переходных процессов. Эти нейтроны испускаются в определенных ядерных переходах, характерных для нескольких типов сильно возбужденных осколков деления, периоды полураспада которых порядок нескольких секунд. Когда эффектный коэффициент размножения нейтронов достаточно велик для того, чтобы нейтронная цепная реакция была самоподдерживающейся на одних только мгновенных нейтронах, время жизни поколения нейтронов определяет собой характерное время переходных процессов. Когда надкритичность реактора невелика и поддерживание цепной реакции без запаздывающих нейтронов невозможно, определяющими становятся сравнительно большие времена запаздывания таких нейтронов, хотя доля их мала. Если бы все нейтроны были мгновенными, было бы чрезвычайно трудно управлять реактором с помощью обычных механических средств, таких, как перемещение топливо, поглотителей или отражатель нейтронов. Чтобы скомпенсировать короткое время жизни нейтронов, потребовались бы высокочастотные органы воздействия. Управлять реактором на быстрых нейтронах было бы просто не возможно [17].

Переходные процессы, определяющие динамику реакторов, по длительности можно условно разбить на следующие группы [17]:

- 1. Быстрые процессы микросекунд секунды (ядерные взрывы, импульсные реакторы, реакторные аварии);
- Процессы малой длительности минуты часы (запуск реактора, изменения реактивности при изменениях уровня мощности, колебания внешней нагрузки атомной электростанции, отравление продуктами деление);
- 3. Процессы большой длительности дни месяцы (выгорание топлива, производства, воздействие радиации на материалы).

В настоящей диссертации рассматривается исследования динамики быстрые переходные процессы импульсного реактора периодического действия ИБР-2М.

При работе импульсного реактора ИБР-2М в режиме саморегулирования единственным стабилизирующим фактором является мощностной обратная связь (MOC). Поэтому при исследовании динамики реактора крайне важно представить MOC в виде обоснованной модели и оценить ее параметров.

1.6 Изучение динамики импульсного реактора ИБР-2

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 [14]. 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 мощности реактора.

При исследовании динамики импульсного реактора ИБР-2М использована методика, которую Ю.Н. Пепелышев, А.К. Попов, Е.П. Шабалин, Е.А. Бодарченко, А.Д. Рогов, В.Д. Денисов, В.Т. Руденко разработали для анализа динамики реакторов ИБР, ИБР-30 и ИБР-2. Ниже приведено краткое описание результатов исследования МОС ИБР-2.

На этапе проектирования реактора ИБР-2 были проведены исследовательские работы по оценке обратной связи, был сделан вывод, что реактивность обратной связи пропорциональна температуре топлива и теплоносителя. В реакторе ИБР-2 измерение температуры топлива не предусмотрено. Не было оно предусмотрено и на 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 (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 1988 - 89 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 тепловыделяющих 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].

19

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 постоянными 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_{μ} . Этот переходный процесс, замеренный в 1997 г., отличался существенными колебаниями мощности (более 40 % от исходного уровня). Рассматривалось несколько вариантов аппроксимации МОС, отличающихся различиями 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 отличие можно объяснить, если предположить, что отрицательная составляющая быстрой МОС обусловлена в основном расширением тепловыделяющих элементов, вызванных 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].

Глава 2. Модель динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2М

Создание динамической модели любого реактора крайне важно с точки зрения оценка его безопасности. Создание же модели реактора, у которого нет аналога, важно вдвойне. С помощью модели можно оценить переходного процессы при различных возмущениях, в том числе при нештатных возмущениях, изменение параметров 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 [36].

- 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 бить блочной для возможности снесения любых изменений и дополнений простым путем, не затрагивающим саму структуру.
- Поскольку длительность импульсов мощности на три порядка меньше периода их следования и еще меньше постоянных времени, источников запаздывающих нейтронов и постоянных времени, характеризующие MOC, то допустимо представлять импульсы мощности пропорциональными дельта-функциям.

Регулируемым параметром реактора является отклонение амплитуды импульса мощности P_m от ее базового значения P_m^0 в относительных единицах: $\Delta p_m = (P_m - P_m^0)/P_m^0$. Базовое значение – это среднее значение амплитуды, соответствующее стационарному режиму, т.е. режиму, когда мощность реактора в среднем постоянна.

Ранее для анализа динамики реактора (в частности, для моделирования переходных процессов) в качестве регулируемого параметра рассматривалось относительное отклонение не амплитуды, а энергии импульса мощности [33], [35] и [36]. Это справедливо лишь для равновесного режима работы, т.е. для режима с периодическим выходом реактора в надкритическое состояние на мгновенных нейтронах. В этом режиме форма и длительность импульсов мощности остаются неизменными и соответственно значения относительной амплитуды и относительной энергия импульса мощности практически равны. Такая подмена регулируемого параметра, упрощающая модель, позволяет моделировать переходные процессы, вызванные таким уменьшением реактивности, при котором мощность реактора падает примерно на два порядка от номинального уровня. Однако, когда реактор переходит в подкритическое состояние на мгновенных нейтронах, что может быть при глубоком изменении мощности (например, при сбросе аварийной защиты), подмена регулируемого параметра приводит к существенному искажению моделируемого процесса. В этом состоянии реактора амплитуда и энергия импульса не пропорциональны, так как в подкритическом состоянии длительность импульса уже не постоянна, она существенно зависит от реактивности.

В отличие от предыдущих вариантов модели в работе представлена модель динамики ИБР-2, справедливая при самом большом допустимом для реактора изменении реактивности и, следовательно, амплитуды импульса мощности.

Импульсы мощности в модели динамики представлены в виде дельтафункций, 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 характеризовать 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

$$z = \exp(j\omega T_{\mu})$$

где ω - круговая частота в с⁻¹, причем ωT_{μ} изменняется в пределах от 0 до π . Сомножитель j (в отличие от индекса j) равен $j = \sqrt{-1}$.

Ниже приведены уравнения, характеризующие динамику реактора, блок схемы модели и некоторые примеры моделированных переходных процессов и анализа устойчивости.

2.1 Исходные уравнения кинетики

В качестве исходных уравнений (2.1) приняты известные уравнения кинетики одноточечной модели реактора [15], которые широко используются при рассмотрении динамики стационарных реакторов [16] [38] и применимы к импульсным реакторам на быстрых нейтронах [10]. 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*.

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\tau} n + \sum_{i=1}^{N_i} \lambda_i C_i; \qquad (2.1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\tau} n - \lambda_i C_i, \qquad (2.2)$$

где n - плотность нейтронов в реакторе; ρ -реактивность; $N_i = 6$ -количество групп запаздывающих нейтронов; β_i , $\beta = \sum \beta_i$ - соответственно доля запаздывающих нейтронов группы i и суммарная; C_i , λ_i - соответственно концентрация и постоянная распада источников запаздывающих нейтронов группы i; τ - эффективное время жизни мгновенных нейтронов; t - время.

В уравнениях (2.1) и (2.2) сделаем замену переменных: от плотности нейтронов перейдем к мощности и от интенсивности источников нейтронов к нормированной интенсивности, выраженной в единицах мощности. В результате уравнения кинетики примут следующий вид:

$$\frac{\tau}{\beta}\frac{dP}{dt} = \frac{\varepsilon}{\beta}P + S; \qquad (2.3)$$

$$S = \sum_{i} S_i; \tag{2.4}$$

$$\frac{1}{\lambda_i}\frac{dS_i}{dt} + S_i = \mu_i P. \tag{2.5}$$

Здесь $P = k_n n$ - мощность реактора $(k_n$ - коэффициент пропорциональности между мощностью и плотностью нейтронов n); $\varepsilon = \rho - \beta$ - реактивность на мгновенных нейтронах; $S_i = k_n \tau \lambda_i C_i / \beta$, $S = \sum S_i$ - соответственно нормированная интенсивность источников запаздывающих нейтронов группы i и суммарная; $\mu_i = \beta_i / \beta$ относительная доля запаздывающих нейтронов группы i. В работе использованы шесть групп запаздывающих нейтронов $(N_i = 6)$. Значения параметров запаздывающих нейтронов при делении ²³⁹Pu быстрыми нейтронами приняты следующими: $\mu_i = 0,038$; 0,28; 0,216; 0,328; 0,103; 0,035; $\lambda_i = 0,0129$; 0,0311; 0,134; 0,331; 1,26; 3,21 [15, 17]; $\beta = 0,00216$ [4]; $\tau = 6,5 \cdot 10^{-8}$ c [39].

В качестве базового режима работы реактора принят режим с установившимися (в среднем) амплитудами импульсов мощности (равновесное состояние). Параметры, соответствующие этому режиму, будем помечать верхним индексом 0.

Полная энергия. Энергия *E*, выделяемая в реакторе за период импульсов мощности, представлена в виде суммы энергии *E*_и, выделяемой в импульсе мощности, и энергии фона *E*_ф, выделяемой в интервале между импульсами мощности:

$$E = E_{\mu} + E_{\phi}. \tag{2.6}$$

Энергия фона. Мощность фона получим из уравнения (2.3), полагая $dP/dt \approx 0$:

$$P_{\Phi} = \frac{\beta}{-\varepsilon_{\Phi}} S. \tag{2.7}$$

Здесь ε_{Φ} - реактивность фона равная

$$\varepsilon_{\Phi} = \varepsilon_m - \Delta k_{\Pi O}, \qquad (2.8)$$

где ε_m - максимум реактивности в импульсе; $\Delta k_{\Pi O} = 0,027$ - эффективность подвижного отражателя. Энергию фона получим, умножая мощность фона на

период импульсов мощности $T_{\rm M}=0,2$ с:

$$E_{\Phi} = P_{\Phi} T_{\mu} = \frac{\beta T_{\mu}}{\Delta k_{\Pi O} - \varepsilon_m} S.$$
(2.9)

Поскольку $\Delta k_{\Pi O}$ много больше, чем ε_m^0 (более чем на порядок), а ε_m^0 существенно больше, чем возможные отклонения ε_m от базового значения $\varepsilon_m^0 = 1, 1 \cdot 10^{-3}$, то формулу (2.9) можно упростить:

$$E_{\rm \Phi} = P_{\rm \Phi} T_{\rm \mu} = \frac{\beta T_{\rm \mu}}{\Delta k_{\rm HO} - \varepsilon_m^0} S_{\rm H}$$

Далее будет использоваться именно эта упрощенная формула.

Между импульсами выделяется лишь 8% от всей энергии реактора. Поэтому допустимо следующее упрощение: считаем, что энергия фона выделяется не непрерывно, а в виде бесконечно узких импульсов, совмещенных с импульсами мощности.

Энергия импульса мощности. На основании проведенных экспериментов реактивность основного подвижного отражателя в районе максимума реактивности описана параболой в диапазоне углов поворота ОПО от -12° до 12° относительно физического центра активной зоны (рис. 2.1). Предшествующий рост реактивности описан сопряженной параболой. Аналогично описан и последующий спад реактивности.



Рисунок 2.1 — Ход реактивности при встречном перемещении роторов ПО-3 в интервале ±12°: По оси абсцисс – смещение ОПО, по оси ординат – отклонение коэффициента размножения от единицы

Энергия импульса мощности E_{μ} и амплитуда импульса мощности P_m пропорциональны интенсивности запаздывающих нейтронов перед началом импульса мощности S и импульсному коэффициенту передачи (M для энергии импульса мощности и M_P для амплитуды импульса мощности):

$$E_{\mathsf{W}n} = M_n S_n, P_{mn} = M_{Pn} S_n \tag{2.10}$$

Импульсные коэффициенты M и M_P , являющиеся нелинейными функциями максимального значения реактивности в импульсе ε_m , вычислены по уравнениям кинетики (2.3)–(2.5) (рис.2.2) [40]. Поскольку длительность импульса мощности очень мала, то обратная связь, влияющая на реактивность, не успевает себя проявить за время импульса. В связи с этим при вычислении Mи M_P , обратная связь не учитывалась.

На рис. 2.2 помечены базовые значения M^0 , M_P^0 и ε_m^0 , соответствующие равновесному состоянию реактора. В модели реактора используется вычисленная зависимость $\ln M = f(\varepsilon_m)$. Она задана таблично, промежуточные значения с достаточной точностью определяются путем линейной интерполяции.



Рисунок 2.2 — Зависимость импульсного коэффициента передачи M по энергии импульса и по амплитуде импульса M_P от реактивности реактора ИБР-2М (ε_m) : $\varepsilon_m^0 = 1.02 \cdot 10^{-3}$, $M^0 = 0.19$ и $M_P^0 = 810.5$ – базовое значение максимума значения реактивности, импульсных коэффициентов передачи соответственно энергии и амплитуды импульса мощности

2.2 Уравнения кинетики импульсного реактора

Итак, мы рассматриваем мощность реактора как последовательность идеальных импульсов. Это позволяет от уравнений кинетики (2.3)-(2.5), из которых первое и третье являются дифференциальными, перейти к алгебраическим уравнениям (2.11)-(2.16), которые связывают значения безразмерных переменных в дискретные моменты времени – в моменты, соответствующие текущему импульсу мощности (с индексом n) и предшествующему импульсу мощности (с индексом n - 1).

$$\frac{E_n}{E^0} = \frac{E_{an}}{E^0} + \frac{E_{\Phi n}}{E^0},$$
(2.11)

$$\frac{E_{{}_{\rm I\!I\!n}}}{E^0} = \frac{E_{{}_{\rm I\!I\!n}}}{E_{{}_{\rm I\!I}}^0} \frac{E_{{}_{\rm I\!I}}^0}{E^0},\tag{2.12}$$

$$\frac{E_{\scriptscriptstyle \rm III}}{E_{\scriptscriptstyle \rm II}^0} = \frac{S_n}{S^0} \frac{M_n}{M^0} = \frac{S_n}{S^0} \exp\left(\ln\frac{M_n}{M^0}\right),\tag{2.13}$$

$$\frac{P_{mn}}{P_m^0} = \frac{S_n}{S^0} \frac{M_{Pn}}{M_P^0} = \frac{S_n}{S^0} \exp\left(\ln\frac{M_{Pn}}{M_P^0}\right),$$
(2.14)

$$\frac{E_{\Phi n}}{E^0} = k_{\Phi} \frac{S_n}{S^0},\tag{2.15}$$

$$\frac{S_n}{S^0} = \sum_i \frac{S_{in}}{S^0},$$
(2.16)

$$\frac{S_{in}}{S^0} = \left(\frac{S_{in-1}}{S^0} + \mu_i \lambda_i \frac{E^0}{S^0} \frac{E_{n-1}}{E^0}\right) \exp\left(-\lambda_i T_{\scriptscriptstyle \rm H}\right).$$
(2.17)

Отметим, что для базового режима (работа со стабильными импульсами мощности) $E_{\phi n} = E_{\phi}^0$, $S_n = S^0$ и уравнение (2.15) примет вид $E_{\phi}^0/E^0 = k_{\phi}$. Таким образом, k_{ϕ} есть доля энергии фона от полной энергии в базовом режиме. Постоянные величины в уравнениях (2.12), (2.15) и (2.17) вычисляются по формулам:

$$\frac{S^0}{E^0} = \sum_i \mu_i \lambda_i \frac{\exp\left(-\lambda_i T_{\scriptscriptstyle \rm II}\right)}{1 - \exp\left(-\lambda_i T_{\scriptscriptstyle \rm II}\right)},\tag{2.18}$$

$$k_{\Phi} = \frac{E_{\Phi}^{0}}{E^{0}} = \frac{\beta T_{\scriptscriptstyle \rm II}}{\Delta k_{\rm IIO} - \varepsilon_{m}} \frac{S^{0}}{E^{0}} = \frac{\beta T_{\scriptscriptstyle \rm II}}{\Delta k_{\rm IIO} - \varepsilon_{m}} \sum_{i} \mu_{i} \lambda_{i} \frac{\exp\left(-\lambda_{i} T_{\scriptscriptstyle \rm II}\right)}{1 - \exp\left(-\lambda_{i} T_{\scriptscriptstyle \rm II}\right)}, \qquad (2.19)$$

$$\frac{E_{\mu}^{0}}{E^{0}} = 1 - k_{\Phi}.$$
(2.20)

Формула (2.18) вытекает из формул (2.17) и (2.16), рассматриваемых для базового режима. Формулы (2.19) и (2.20) получаются из формул (2.9.а) и (2.11) аналогичным образом.

Итак, импульсный реактор нулевой мощности описывается алгебраическими уравнениями (2.11)–(2.20). Уравнения (2.11)–(2.16) связывают между собой значения переменных, соответствующие текущему импульсу мощности, а уравнение (2.17) – текущему и предшествующему импульсам, т.е. значения в дискретные моменты времени. Уравнение (2.17) называется разностным и является аналогом дифференциального уравнения (2.5), которое связывает значения переменных в любые моменты времени.

2.3 Импульсная доля запаздывающих нейтронов

Из рис. 2.2, на котором параметр M изображен в логарифмическом масштабе, следует, что в окрестности базового значения M^0 зависимость $\ln M$ от ε_m близка к линейной в достаточно широком диапазоне изменения M. Разложим функцию $\ln (M/M^0)$ в ряд Тейлора в окрестности $M = M^0$, отбросив высшие производные (имея в виду любой импульс, опустим в формуле (2.13) индекс n). В результате такого разложения получим

$$\ln \frac{M}{M^0} = \frac{d \ln \left(\frac{M}{M^0}\right)}{d\varepsilon_m} \bigg|_{\varepsilon_m^0} \Delta \varepsilon_m \tag{2.21}$$

Обратная величина первого сомножителя в уравнении (2.21)

$$\beta_{\mathrm{H}} = \frac{1}{\frac{d\ln(M/M^0)}{d\varepsilon_m}} = \frac{M^0}{\frac{dM}{d\varepsilon_m}}$$
(2.22)

называется импульсной долей запаздывающих нейтронов [5] (для реактора ИБР-2М $\beta_{\mu} = 1,54 \cdot 10^{-4}$). Введя новое обозначение

$$r = \frac{\varepsilon}{\beta_{\scriptscriptstyle \rm H}},\tag{2.23}$$

упростим входящую в уравнения кинетики формулу (2.13):

$$\frac{E_{\scriptscriptstyle \rm III}}{E_{\scriptscriptstyle \rm III}^0} = \frac{S_n}{S^0} \exp\left[\frac{\varepsilon_{mn}}{\beta_{\scriptscriptstyle \rm III}} - \frac{\varepsilon_m^0}{\beta_{\scriptscriptstyle \rm III}}\right] = \frac{S_n}{S^0} \exp(\Delta r_{mn}) \tag{2.24}$$

где ε - реактивность на мгновенных нейтронах в абсолютных единицах, а r – в долях $\beta_{\rm u}$; $\Delta r = r - r^0$ - отклонение реактивности на мгновенных нейтронах от базового значения в долях $\beta_{\rm u}$. Из формулы (2.24) видно, что в базовом режиме $\Delta r_{mn} = 0$.

Из формулы (2.24) следует, что относительная энергия импульса мощности E_{μ}/E_{μ}^{0} является функцией относительного источника запаздывающих нейтронов S/S^{0} и отклонения реактивности $\Delta r_{m} = (\varepsilon_{m}/\beta_{\mu}) - (\varepsilon_{m}^{0}/\beta_{\mu})$ выраженной в долях β_{μ} . Таким образом, если в стационарных реакторах реактивность удобно выражать в долях β , то в импульсном реакторе – в долях β_{μ} .

Вместо относительных переменных удобнее использовать относительные отклонения переменных от их базовых значений:

$$\Delta e_{\pi n} = \frac{\Delta E_{\pi n}}{E_{\pi}^{0}} = \frac{E_{\pi n} - E_{\pi}^{0}}{E_{\pi}^{0}}$$
$$\Delta p_{mn} = \frac{\Delta P_{mn}}{P_{m}^{0}} = \frac{P_{mn} - P_{m}^{0}}{P_{m}^{0}}$$
$$\Delta e_{\phi n} = \frac{\Delta E_{\phi n}}{E_{\phi}^{0}} = \frac{E_{\phi n} - E_{\phi}^{0}}{E_{\phi}^{0}}$$
$$\Delta e_{n} = \frac{\Delta E_{n}}{E^{0}} = \frac{E_{n} - E^{0}}{E^{0}}, \Delta s_{in} = \frac{\Delta S_{in}}{S^{0}} = \frac{S_{in} - S_{i}^{0}}{S^{0}}$$
$$\Delta s_{n} = \frac{\Delta S_{n}}{S^{0}} = \frac{S_{n} - S^{0}}{S^{0}} = \sum_{i} \Delta s_{in} = \sum \frac{\Delta S_{in}}{S^{0}}.$$

Очевидно, что в режиме стабилизации необходимо поддерживать либо $E_{\text{иn}}/E_{\text{и}}^0 = 1$, либо $\Delta E_{\text{иn}} = \Delta E_{\text{иn}}/E_{\text{u}}^0 = 0$, что удобнее.

В связи с этим вместо уравнений (2.16) и (2.17) в модели использованы соответствующие им уравнения (2.26) и (2.27):

$$\Delta s_n = \sum_i \Delta s_{in},\tag{2.26}$$

$$\Delta s_{in} = \left(\Delta s_{in-1} + \mu_i \lambda_i \frac{E^0}{S^0} \Delta e_{n-1}\right) \exp\left(-\lambda_i T_{\scriptscriptstyle \rm H}\right). \tag{2.27}$$

Уравнениям запаздывающих нейтронов (2.26) и (2.27) соответствуют дискретные передаточные функции

$$W_{s}(z) = \frac{\Delta s(z)}{\Delta e(z)} = \sum_{i=1}^{6} W_{si}(z), W_{si}(z) = \frac{\Delta s_{i}(z)}{\Delta e(z)} = b_{si} \frac{z^{-1}}{a_{si} - z^{-1}}, \qquad (2.28)$$

где
$$a_{si} = \exp(\lambda_i T_{\mu})$$
 и $b_{si} = \mu_i \lambda_i / \left(\sum_{i=1}^6 \mu_i \lambda_i \frac{1}{\exp(\lambda_i T_{\mu}) - 1} \right).$

2.4 Уравнения МОС импульсного реактора ИБР-2М

В реактивность MOC, соответствующая n-ному импульсу мощности, представлена суммой трех составляющих:

$$r_{Tn} = \sum_{j=1}^{3} r_{Tjn}.$$
 (2.29)

Три составляющие (j = 1, 2, 3) с нелинейными коэффициентами передачи k_{TjN} соответствуют быстрой МОС и для *n*-ного импульса описаны следующими уравнениями.

$$r_{Tjn} = \left(r_{Tjn-1} + \Delta E_{n-1} \frac{k_{TjN}}{T_{Tj}}\right) \exp\left(-\frac{T_{\scriptscriptstyle \rm II}}{T_{Tj}}\right),\tag{2.30}$$

где T_{Tj} - постоянная времени *j*-й составляющей МОС.

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

$$k_{TjN} = k_{Tj} \left(1 + c_j r_{Tjn-1} \right), \qquad (2.31)$$

т.е. зависит от r_{T1} , а для j = 2, 3

$$k_{TjN} = k_{Tj} \left(1 + c_j r_{Tn-1} \right),$$

т.е. зависить от r_T .

Здесь k_{Tj} , c_j – соответственно составляющая коэффициента передачи, не зависящая от реактивности МОС, и коэффициент нелинейности, учитывающий зависимость коэффициента передачи k_{TjN} от реактивности.

Уравнения (2.29) и (2.30) 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.

Мощностной обратной связи соответствуют передаточные функции

$$W_{Tj}(z) = \frac{r_{Tj}(z)}{\Delta E(z)} = b_{Tj} \frac{z^{-1}}{a_{Tj} - z^{-1}}, j = 1, 2, 3$$
(2.32)

где $a_{Tj} = \exp{(T_{\mu}/T_{Tj})}, \ b_{Tj} = k_{Tj}/T_{Tj}$ в $\beta_{\mu}/MДж$.

Для j = 1, 2, 3 под $\Delta E(z)$ в формуле (2.32) понимается функция $\Delta E_j(z)$, являющаяся z - изображением дискретной функции времени ΔE_{jn} , причем для $j = 1 \ \Delta E_{jn} = \Delta E_n (1 + c_j r_{T1n})$, а для $j = 2, 3 \ \Delta E_{jn} = \Delta E_n (1 + c_j r_{Tn})$.

2.5 Регулируемый параметр реактора ИБР-2М

В качестве регулируемого параметра реактора ИБР-2М принята относительная амплитуда импульса мощности

$$p_m = \frac{P_m}{P_m^0} \tag{2.33}$$

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 · 10⁻⁴), то относительная амплитуда p_m практически равна относительной энергии импульса мощности

$$p_m \approx \frac{E_{\scriptscriptstyle \rm H}}{E_{\scriptscriptstyle \rm H}^0}.\tag{2.34}$$

Базовое значение E^0_{μ} , как следует из уравнений (2.23), (2.15) и (2.16), примерно равно

$$E_{\mu}^{0} = P^{0}T_{\mu} \left(1 - \frac{\beta T_{\mu}}{\Delta k_{\Pi O} - \varepsilon_{m}^{0}} \sum_{i=1}^{6} \mu_{i} \lambda_{i} \frac{1}{\exp\left(-\lambda_{i} T_{\mu}\right) + 1} \right).$$
(2.35)

2.6 Структура и уравнения автоматического регулятора

В качестве статистически оптимального принят AP, обеспечивающий в режиме стабилизации минимум вероятного среднеквадратического относительного отклонения энергии будущего (n-го) импульса мощности на основании информации, полученной из предшествующих (k-ых) импульсов мощности (k < n). При этом информации от предшествующих импульсов придается разный вес и тем самым вводится принцип старения информации. В результате статистически оптимальный алгоритм AP приобретает следующий вид [41]:

$$r_{An} = \frac{1}{\sum_{k=0}^{n-1} a_{n-k}^2} \sum_{k=0}^{n-1} a_{k=0}^2 \left(r_{Ak} - \Delta e_{\mathbf{n}k} \right)$$
(2.36)

где r_{An} , r_{Ak} – выраженные в долях β_{μ} отклонения реактивности AP от среднего (базового) уровня, относящиеся к будущему (*n*-му) и предшествующим (*k*-ым) импульсам мощности соответственно, $\Delta e_{\mu k}$ – относительные отклонения энергии предшествующих импульсов мощности (k = 0 соответствует началу отсчета – началу набора автоматическим регулятором информации), $a_{n-k}^2 \leq 1$ параметр, зависящий от разности номеров импульсов $n - k \ge 1$, характеризует степень старения информации, полученной из предшествующих импульсов мощности.

Подробный вывод статистически оптимального алгоритма приведен в работе [42], причем как для режима стабилизации, так и для других возможных режимов работы реактора.

Формула (2.36) для импульсной системы, являющаяся аналогом интеграла Дюамеля для непрерывной системы, связывает выходной сигнал AP r_{An} в будущем (*n*-м) импульсе с значениями входного сигнала AP ($r_{Ak} - \Delta e_{\mu k}$), соответствующими предшествующим (уже прошедшим) импульсам с номерами k = 0, 1, ..., n - 1, и с дискретными значениями импульсной переходной характеристики AP $w_{An-k} = \left(1 / \sum_{k=0}^{n-1} a_{n-k}^2\right) a_{n-k}^2$. Из формулы (2.36) следует, что импульсная переходная характеристика AP, т.е. реакция AP на единичный импульс (импульс единичной площади), подаваемый на AP в момент, соответствующий импульсу с номером m = 0, описывается выражением

$$w_{An} = \left(1 / \sum_{m=1}^{n} a_n^2\right) \sum_{m=1}^{n} a_{n-k}^2$$
(2.37)

где $n \ge 1$.

Таким образом, импульсная переходная характеристика и, следовательно, структура AP определяется выбором функции a_{n-k}^2 в формуле (2.36). Наиболее естественными представляются два варианта выбора этой функции. Первый, когда более ранней информации придается меньший вес, иначе говоря, когда с ростом индекса n - k параметр a_{n-k}^2 уменьшается ($a_0^2 = 1 > a_1^2 > a_2^2 > \ldots$). Второй, когда информации, полученной в N предшествующих импульсах, придается наибольший вес, а информация, полученная в более ранних импульсах, считается недостоверной и не учитывается ($a_{n-k}^2 = 1$ при $1 \leq n - k \leq N$ и $a_{n-k}^2 = 0$ при n - k > N). В работе рассмотрены эти два варианта.

Первый вариант. Функция a_{n-k}^2 описана убывающей экспонентой:

$$a_{n-k}^2 = \exp\left(-(n-k)\frac{T_{\scriptscriptstyle \rm H}}{T_A}\right),\tag{2.38}$$

где $T_{\rm u}$ – период импульсов мощности, T_A – постоянная времени экспоненциальной функции a_{n-k}^2 .

Из формулы (2.37) следует, что начиная уже с номера импульса $n > 5T_A/T_{\rm H}$ сумму $\sum_{k=0}^{n-1} a_{n-k}^2$ в алгоритме (2.36) можно считать постоянной величиной. Учитывая это, импульсная переходная характеристика АР (2.37) для ИБР-2М приобретает следующий вид:

$$w_{An} = \left(1 - \exp\left(-\frac{T_{\scriptscriptstyle \rm H}}{T_A}\right)\right) \sum_{m=1}^n \exp\left(-m\frac{T_{\scriptscriptstyle \rm H}}{T_A}\right).$$
(2.39)

Это импульсная переходная характеристика апериодического звена с импульсной передаточной функцией

$$W_A(z) = \frac{r_A(z)}{\delta_A(z)} = \left(1 - \exp\left(-\frac{T_{\scriptscriptstyle \rm I\!I}}{T_A}\right)\right) \frac{z^{-1}}{1 - \exp\left(-\frac{T_{\scriptscriptstyle \rm I\!I}}{T_A}\right) z^{-1}},\tag{2.40}$$

где $r_A(z)$ и $\delta_A(z)$ – соответственно z - изображения выходного и входного сигналов AP, рассматриваемых как решетчатые функции – функции, отличные от нуля лишь в дискретные моменты времени (в моменты появления импульсов мощности). При соотношении $T_A \gg T_{\mu}$ импульсная передаточная функция AP (2.40) упрощается, принимая вид импульсной передаточной функции интегратора:

$$W_A(z) = \frac{r_A(z)}{\delta_A(z)} = \frac{T_{\scriptscriptstyle \rm II}}{T_A} \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}},$$
(2.41)

АР ИБР-2М представляет собой именно такой интегратор. Значение T_A может устанавливаться различным, для чего используется соотношение $T_A = 10\Delta$, где Δ – варьируемый параметр. В настоящее время принято $\Delta = 0,2$, т.е. $T_A = 2$ и коэффициент передачи АР в формуле (2.41) равен $T_{\mu}/T_A = 0,1$. Δ – параметр скорости АР: чем он больше, тем меньше скорость АР при одном и том же сигнале на его входе.

Из соображений еще большего ослабления влияния шумов на работу AP регулируемый параметр Δe_{un} пропускается через дополнительно введенный фильтр и превращается в сглаженный сигнал $\Delta \tilde{e}_{un}$. В итоге на вход AP подается не сигнал $\delta_{An} = -\Delta e_{un}$, а сглаженный сигнал $\delta_{An} = -\Delta \tilde{e}_{un}$. Алгоритм сглаживания фильтра удовлетворяет статистически оптимальному критерию аналогичному критерию оптимальности AP [43] и выражается формулой

$$\Delta \tilde{e}_{\mathfrak{u}n} = \Delta \tilde{e}_{\mathfrak{u}n-1} + \frac{1}{q} \left(\Delta e_{\mathfrak{u}n} - \Delta \tilde{e}_{\mathfrak{u}n-1} \right), \qquad (2.42)$$

где q > 1 – коэффициент сглаживания (при $q = 1 \Delta \tilde{e}_{un} = \Delta e_{un}$, т.е. фильтр не работает и сглаживания регулируемого параметра не проводится).

Фильтру с алгоритмом (2.42) соответствует импульсная передаточная функция

$$W_{\sim}(z) = \frac{\Delta \tilde{e}_{\scriptscriptstyle \rm II}(z)}{\Delta e_{\scriptscriptstyle \rm III}} = \frac{\frac{1}{q-1}}{\frac{q}{q-1} - z^{-1}}.$$
(2.43)

Второй вариант. Учитывается только информация, полученная из N предшествующих импульсов мощности, и ей придается наибольший вес ($a_{n-k}^2 = 1$ при $1 \leq n-k \leq N$ и $a_{n-k}^2 = 0$ при n-k > N). Этому случаю соответствует статистически оптимальный алгоритм АР

$$r_{An} = \frac{\sum_{k=1}^{N} \left(r_{An-k} - \Delta e_{{}_{\mathrm{M}n-k}} \right)}{N} \tag{2.44}$$

Таким образом, выходной сигнал AP представляет собой среднеарифметическое значение N предшествующих входных сигналов. Из формулы (2.44) следует, что импульсная передаточная функция AP равна.

$$W_A(z) = \frac{r_A(z)}{\delta_A(z)} = \frac{z^{-1}}{N} \frac{z^{-N}}{1 - z^{-1}}.$$
(2.45)

2.7 Модель динамики импульсного реактора ИБР-2М

Модели реактора ИБР-2М, работающего в штатном режиме поддержания нулевого отклонения энергии импульсов мощности от заданного уровня (режим стабилизации мощности), соответствует блок-схема, показанная на рис. 2.3. Модель представлена в виде замкнутой системы управления с тремя каналами обратной связи, обусловленными запаздывающими нейтронами (на рис. 1 этот канал включён в блок кинетики), разогревом реактора (блок мощностной обратной связи МОС) и автоматическим регулятором (блок AP). Схемы соответствуют уравнениям динамики (линейным и нелинейным). Эти блоки более детально показаны на рис.2.4-2.6.



Рисунок 2.3 — Блок-схема реактора ИБР-2М: 1 – блок возмущения реактивности; 2 – блок автоматического регулятора; 3 – блок кинетики импульсного реактора; 4 – блок мощностной братной связи; ε_m^0 – базовое значение максимальной надкритичности на мгновенных нейтронах в импульсе реактивности; ε_F , ε_T , ε_A – реактивность, обусловленная соответственно внешними факторами, мощностной обратной связью и вносимая автоматическим регулятором; Δe , Δe_{μ} – относительное отклонение энергии и энергии импульсов мощности от их среднего значения соответственно

Линейные уравнения связывают дискретные значения переменных, относящиеся к соседним импульсам мощности. Этим уравнениям в модели
соответствуют дискретные передаточные функции $W_{si}(z)$, $W_{Tj}(z)$, $W_A(z)$ и $W_{\sim}(z)$, которыми удобно пользовать при исследовании импульсных систем автоматического регулирования икторые представляют собой отношения z - изображений выходных сигналов к входным.



Рисунок 2.4 — Блок-схема кинетики импульсного реактора ИБР-2М



Рисунок 2.5 — Блок-схема мощностной обратной связи

В модели предусмотрен также блок возмущающей реактивности. На его выходе можно создать различные виды возмущений реактивности, в частности, возмущение, вызванное преднамеренными перемещением промежуточного регулятора (ПР), блоков аварийной защиты (АЗ1 и АЗ2) и компенсирующих органов (КО1 и КО2). Также можно вычислять изменение реактивности, вызванное перемещением автоматического регулятора (АР) при работе реактора в режиме автоматической стабилизации мощности.



Рисунок 2.6 — Блок-схема AP импульсного реактора ИБР-2М. W_A^*, W_\sim^* – импульсные передаточные функции AP и фильтра соответственно

В модели учтены следующие нелинейные зависимости.

- Зависимость импульсного коэффициента передачи энергии импульса мощности M = E_и/S (отношения энергии импульса мощности к суммарному источнику нейтронов) от реактивности ИБР-2М,
- Зависимость импульсного коэффициента передачи амплитуды импульса мощности M_P = P_m/S (отношения амплитуды импульса мощности к суммарному источнику нейтронов) от реактивности ИБР-2М,
- 3. Зависимость реактивности стержней АЗ (АЗ1 и АЗ2), КО (КО1 и КО2), ПР и АР от их положения в активной зоне (рис. 2.7).
- 4. Зависимость коэффициентов передачи МОС от ее реактивности.



Рисунок 2.7 — Градуировочная кривая эффективности блоков СУЗ. Слева: эффективность $(k_{a\phi})$ стержней АЗ (1) и КО (2 и 3) в абсолютных единицах в зависимости от их положения в активной зоне (*L*) (в мм). Справа:

эффективность стержней ПР и АР (в абсолютных единицах) в зависимости от их положения в активной зоне. 1 – АЗ1, АЗ2, 2 – КО1, 3 – КО2, 4 – ПР, 5 – АР

Параметры $M = E_{\rm u}/S$ и $M_P = P_m/S$, являющиеся импульсными коэффициентами передачи соответственно для энергии и амплитуды импульса мощности, нелинейно зависят от максимального значения реактивности в импульсе ε_m . Эти параметры вычислены по уравнениям кинетики.

В модель введены логарифмы этих параметров $\ln M(\varepsilon_m)$ и $\ln M_P(\varepsilon_m)$ в виде таблиц. Промежуточные значения этих параметров с достаточной точностью определяются путем линейной интерполяции. Режиму стабилизации, т.е. режиму с постоянной амплитудой импульсов мощности, соответствует значение реактивности в максимуме $\varepsilon_m^0 = 1,02 \cdot 10^{-3}$ (рис. 2.2).



Рисунок 2.8 — Преднамеренное изменение реактивности промежуточным регулятором и вызванное этим относительное отклонение энергии импульсов мощности: 1 – реактивность промежуточного регулятора, 2, 3 – соответственно зарегистрированное и смоделированное относительное отклонение энергии импульсов мощности

Чтобы убедиться, что в модели ИБР-2М как в физическом представлении реактора, так и в программной реализации не допущены ошибки, на ней были смоделированы переходные процессы в реакторе ИБР-2. Значения параметров модели были приняты равными параметрам модели ИБР-2. Смоделированные при таких значениях параметров переходные процессы полностью совпали с аналогичными процессами, ранее полученными на модели ИБР-2. Также были смоделированы переходные процессы в реакторе ИБР-2М, обусловленные перемещением вниз и вверх промежуточного регулятора. Переходные процессы, вызванные этими перемещениями ПР (при наличии существенных шумов), ранее были зарегистрированы. По этим процессам ранее были оценены параметры двух каналов МОС ИБР-2М и рассчитаны переходные процессы, обусловленные только перемещением ПР, оценены параметры лишь двух блоков [44]. Полученные на модели ИБР-2М переходные процессы совпали с расчетными. В качестве примера на рис.2.8 показаны зарегистрированные переходные процессы в реакторе ИБР-2М при средней мощности 2 МВт и смоделированные процессы.



Рисунок 2.9 — Перемещение блоков СУЗ по сигналу на сброс и изменение реактивности в результате. Слева: перемещение блоков АЗ и КО по сигналу на сброс АЗ: 1 - АЗ1, 2 - АЗ2, 3 - КО1, 4 - КО2, 5 - ПР. Справа: изменение реактивности в результате перемещения блоков АЗ, КО и ПР по сигналу сброса АЗ: 1 - АЗ1, 2 - АЗ2, 3 - КО1, 4 - КО2, 5 - ПР, 6 – суммарная

Приведены результаты моделирования переходных процессов при сбросе A3 (рис. 2.9), когда амплитуда импульса мощности уменьшается почти на 5 порядков за время не более 10 с. На модели получены процессы при разных уровнях средней мощности реактора перед сбросом (от 0,2 до 2 МВт). Смоделированные процессы практически совпадают с зарегистрированными в диапазоне уменьшения амплитуды импульса мощности почти на четыре порядка (рис. 2.10). Отличие наблюдается при дальнейшем уменьшении амплитуды. Однако при столь низких уровнях мощности это отличие уже несущественно.

Моделирование процессов проведено в соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 2.6. Поскольку динамика реактора существенно зависит от параметров обратной связи, обусловленной разогревом реактора, до моделирования были оценены значения этих параметров. Оценка осуществлена посредством математической обработки зарегистрированных переходных процессов мощности, обусловленных преднамеренными прямоугольными колебаниями реактивности, в режиме саморегулирования.



Рисунок 2.10 — Переходные процессы амплитуда импульсов мощности, вызванные сбросом АЗ и аварийным перемещением КО и ПР: *a*) средняя мощность реактора 0,2 МВт; *б*) 1 МВт; *в*)1,5 МВт; *г* 2 МВт. *P_m* – амплитуда импульса мощности (1 – модель, 2 – эксперимент); *t* – время

Для обоих вариантов AP вычислены переходные процессы мощности при различных возмущениях реактивности. А именно: a) регулярное возмущение в

41



Рисунок 2.11 — Относительное отклонение энергии импульсов мощности Δe_{un} при скачке реактивности (в долях β_{u}) $r_F = -0.1$ для первого варианта AP: a)

АР отключен (режим саморегулирования); б) параметр фильтра q = 1(фильтр отключен); e) q = 4; e) q = 8; d) q = 16; e) q = 32. 1 - параметр скорости АР $\Delta = 0.05$; 2 - $\Delta = 0.1$; 3 - $\Delta = 0.2$. n - номер импульса мощности

виде скачка $r_F = -0,1, 6$) реальный шум реактивности, вычисленный реактиметром по зарегистрированному шуму мощности при работе реактора в режиме саморегулирования при номинальной средней мощности 2 МВт и в) случайное возмущение в виде белого шума с дисперсией $\sigma_F^2 = 0,05^2$.

Приведенные ниже рисунки иллюстрируют результаты расчетов для номинальных значений средней мощности 2 МВт и расхода теплоносителя (натрия) 100 м³/час.

42

На рис. 2.11 для первого варианта AP показаны переходные процессы, вызванные скачком реактивности при разных значениях коэффициента сглаживания фильтра q и параметра скорости AP Δ . Там же для сравнения показаны аналогичные переходные процессы для режима саморегулирования, т.е. без AP.



Рисунок 2.12 — Относительное отклонение энергии импульсов мощности $\Delta e_{\text{иn}}$ при скачке реактивности (в долях $\beta_{\text{и}}$) $r_F = -0,1$ для второй варианта AP: 1 - параметр AP N = 1; 2 - N = 8; 3 - N = 16; 4 - N = 32. n - номер импульса мощности

На рис. 2.12 показаны аналогичные процессы для второго варианта AP в зависимости от числа N предыдущих импульсов мощности, по которым путем усреднения входных сигналов AP формируется его выходной сигнал.

На рис. 2.13 показано среднеквадратическое отклонение энергии импульсов мощности σ , обусловленное шумом реактивности, при разных значениях коэффициента сглаживания фильтра q и параметра скорости AP Δ (первый вариант AP) и при разных значениях параметра N (второй вариант AP). Кривые на рис. 2.13 рассчитаны для реального шума реактивности. Кривые, рассчитанные для возмущения реактивности в виде белого шума, не отличаются существенно от кривых, показанных на рис. 2.13.



Рисунок 2.13 — Среднеквадратическое отклонение энергии импульсов мощности σ как функция параметра фильтра q и параметра AP N:
1 - Δ = 0,05; 2 - Δ = 0,1; 3 - Δ = 0,2 (первый вариант AP); 4 - второго варианта AP

2.8 Модель реактиметра импульсного реактора ИБР-2М

В штатных режимах поведение реактора типа ИБР-2 может быть описано обычными уравнениями кинетики, если вместо эффективной доли запаздывающих нейтронов β ввести так называемую импульсную долю β_и [5]: β_и = $= M^0 \left/ \frac{dM}{d\epsilon_m} \right|_{s^0}$, где M и M^0 – импульсный коэффициент передачи и его базовое значение, соответствующее установившемуся режиму; ε_m и ε_m^0 - текущее и базовое значение реактивности на мгновенных нейтронах в максимуме импульса. Описание импульсного реактора периодического действия подобное стационарному справедливо при умеренных изменениях реактивности, когда допустима линейная аппроксимация нелинейной зависимости М от ε_m . Для реактора ИБР-2М $\beta_{\mu} = 1,54 \cdot 10^{-4}$, т.е. в 14 раз меньше, чем $\beta = 2,16 \cdot 10^{-3}$. Вследствие этого чувствительность реактора к изменению реактивности в импульсном режиме в 14 раз выше, чем при его работе в режиме непрерывного выделения мощности. Это приводит к большим флуктуациям энергии импульсов мощности (до ± 22%). Для обеспечения безопасной работы реактора необходимы исследования как случайных возмущений реактивности, так и ее регулярных составляющих, обусловленных перемещением

органов управления и работой технологических систем, обеспечивающих нормальное функционирование реактора.

Создание математический модели реактиметра ИБР-2М стало логическим продолжением работ, посвященных созданию модели для анализа динамики импульсного реактора [35] [36].

Импульсные коэффициенты передачи M и M_P , вычисленные по уравнениям (2.3-2.5) и (2.10), представляют собой нелинейные функции максимального значения реактивности в импульсе ε_m . В модели реактиметра использованы полученные из этих функций зависимости ε_m от M и M от M_P (рис.2.14).



Рисунок 2.14 — Слева зависимость максимальной реактивности ε_{mn} от импульсного коэффициента передачи для энергии импульса мощности M. Справа зависимость импульсного коэффициента передачи для энергии M от импульсного коэффициента передачи для амплитуды импульса мощности $M_P(в$ относительных единицах)

В ИБР-2М регистрируется амплитуда каждого *n*-го импульса мощности P_{mn} . Входной величиной импульсного реактиметра является относительная амплитуда импульса мощности P_{mn}/P_m^0 , где P_m^0 – базовая (заданная) амплитуда импульса мощности. Выходной является рассчитанная по уравнениям (2.11-2.20), (2.25-2.27) максимальная реактивность ε_{mn} , соответствующая *n*-му импульсу. Блок-схема реактиметра, осуществляющая эти вычисления, показана на рис. 2.15.

Импульсному реактору присущи значительные шумы реактивности, вследствие чего наблюдается большой разброс амплитуд и, следовательно, энергии импульсов (до ±22%). Вычисленную реактиметром реактивность ИБР-2М можно использовать напрямую для его статистического (спектрального, корреляционного и др.) анализа состояния. Регулярная составляющая реактивности, обусловленная это и медленным "уходом" реактивности вследствие изменения параметров, и преднамеренным изменением реактивности органами управления для периодической их оценки параметров фактически "тонет" в шумах. Таким образом, для оценки регулярной составляющей вычисленная реактивность не может быть использована напрямую, шумы реактивности необходимо отфильтровать.



Рисунок 2.15 — Блок-схема реактиметра импульсного реактора ИБР-2М: 1 - блок формирования энергии фона $(E_{\phi n}/E^0 = (S_n\beta T_{\mu})/E^0(\Delta k_{\text{п.о.}} - \varepsilon_{mn})); 2$ - блок запаздывающих нейтронов, формирующий выходной сигнал по формулам (2.26 - 2.27); $m_P = M_P/M_P^0; u^{-1}$ - блок, формирующий на выходе обратную входной величину

Статистически оптиамльный фильтр для реактиметра. Есть разные методы фильтрации сигналов с шумами. Так, метод статистической фильтрации Калмана–Бьюси [45] сводится к решению некоторой системы неоднородных дифференциальных уравнений. Случайный сигнал для определения его текущего среднего значения должен быть сначала описан специально подобранным дифференциальным уравнением. Это уравнение должно связывать исходный случайный сигнал, рассматриваемый как выходной, с другим случайным в виде "белого шума", который принимается в качестве входного.

В предлагаемом импульсном реактиметре использован принципиально иной метод фильтрации. В нем как постановка задачи, так и способ ее решения носят прикладной инженерный характер с ясным физическим смыслом, а не формально математический. Метод основан на принципе статистически оптимального алгоритма, впервые предложенного применительно к регулированию мощности импульсного реактора [41]. Этот принцип оказался универсальным и позднее был распространен на возможные иные режимы работы реактора, а затем применен непосредственно к задаче собственно фильтрации [42, 43, 46].

Статистически оптимальный фильтр превращает входной дискретный сигнал, характеризующийся существенным разбросом, в дискретный сглаженный по закону

$$\tilde{x}_n = \tilde{x}_{n-1} + \frac{(x_n - \tilde{x}_{n-1})}{q},$$
(2.46)

где x_n , \tilde{x}_n –входной и выходной дискретный сигнал соответственно, $q \ge 1$ – коэффициент сглаживания. При q = 1 $\tilde{x}_n = x_n$, т.е. входной сигнал не сглаживается. Дискретная частотная передаточная функция фильтра (отношение фурье-изображений дискретных сигналов выходного к входному) имеет вид

$$W_{\sim}^{*} = \frac{\tilde{x}(j\overline{\omega})}{x(j\overline{\omega})} = \frac{1/(q-1)}{[q/(q-1)] - \exp(-j\overline{\omega})},$$
(2.47)

где $\overline{\omega} = \omega T_{\mu}$ – относительная (безразмерная) круговая частота в диапазоне $0 \leq \overline{\omega} \leq \pi$; ω – круговая частота, с⁻¹. На рис. 2.16 показаны частотные характеристики фильтра.



Рисунок 2.16 — Логарифмические амплитудные (L_{\sim}) и фазочастотные (φ_{\sim}) характеристики фильтра при коэффициенте сглаживания 4 (1), 8 (2), 16 (3), 32 (4)

Рассмотрены два варианта расположения статистически оптимального фильтра относительно реактиметра. В первом варианте по относительной амплитуде импульса мощности, характеризующейся шумами, вычисляется соответствующая реактивность (тоже с шумами), которая сглаживается фильтром (рис. 2.17.*a*). Во втором варианте фильтром сглаживается относительная амплитуда импульсов мощности (рис. 2.17.*б*) и по ней вычисляется соответствующая реактивность. Лучшие результаты соответствуют первому варианту. Такая оценка основана на анализе зарегистрированного переходного процесса амплитуды импульсов мощности, обусловленного преднамеренным изменением реактивности посредством перемещения штатного органа управления (промежуточного регулятора). Реактивность изменялась промежуточным регулятором линейно. Реактор работал в режиме саморегулирования. Вычисленная в первом варианте реактивность при наличии шумов сравнивалась со сглаженной, соответствующей как первому, так и второму варианту. В таблице (таб.2) приведены среднеквадратические отклонения $\sigma = \sqrt{(1/N) \sum_{n=1}^{N} (\Delta \varepsilon_{mn} - \Delta \tilde{\varepsilon}_{mn})}$ для разных коэффициентов сглаживания q, вычисленные за время перемещения промежуточного регулятора.





Таблица 2 — Среднеквадратическое отклонение при разных значениях коэффициента сглаживания для двух вариантов расположения фильтра

Вариант	$\sigma, 10^{-5}$				
	q = 4	q = 8	q = 16	q = 32	
1	0,628	0,718	0,777	0,824	
2	0,642	0,770	0,988	$1,\!5$	

На рис. 2.18 показано перемещение промежуточного регулятора и вызванное им относительное отклонение амплитуды импульсов мощности, рис. 2.19 – реактивность при наличии шумов и сглаженная реактивность для первого варианта расположения фильтра при разных коэффициентах сглаживания. При коэффициенте сглаживания фильтра в диапазоне 4 – 8 достигается приемлемое сглаживание реактивности как в переходном, так и стационарном режиме.



Рисунок 2.18 — Зарегистрированные переходные процессы: a – перемещение промежуточного регулятора $L_{\Pi P}$; δ – относительное отклонение амплитуды импульса мощности $\Delta p_m = \left(P_m - P_m^0\right)/P_m^0$



Рисунок 2.19 — Реактивность $\Delta \varepsilon_m(1)$, соответствующая рис. 2.17, и сглаженная реактивность $\Delta \tilde{\varepsilon}_m$ для первого варианта расположения фильтра (см. рис. 2.16а) при коэффициенте сглаживания: q = 4 (2); 8(3); 16(4); 32(5)

2.9 Выводы к Главе II

Создан вариант модели динамики реактора ИБР-2М в режиме саморегулирования для вычисления процессов при быстром и широком диапазоне изменения реактивности (и, следовательно, мощности). Проведены тестовые проверки модели применительно к известным переходным процессам в реакторе ИБР-2 и к рассчитанным процессам в реакторе ИБР-2М, показавшие правильность модели.

Приемлемость модели подтверждена путем сравнения смоделированных процессов с зарегистрированными при сбросе аварийной защиты, когда регулируемый параметр (относительная амплитуда импульса мощности) уменьшается почти на пять порядков. Моделирование проведено при разных уровнях средней мощности (от 0,2 до 2 МВт). При уменьшении относительной амплитуды импульса мощности примерно на первые четыре порядка получено хорошее приближение смоделированных процессов к зарегистрированным. При дальнейшем уменьшении амплитуды наблюдается некоторое отличие, однако при столь низких уровнях мощности это отличие уже несущественно.

В связи с существенным разбросом амплитуд импульсов мощности рассмотрены два варианта автоматического регулятора, удовлетворяющие критерию минимума вероятного среднеквадратического отклонения амплитуды будущего импульсах мощности на основании информации, полученной в уже прошедших импульсах. Отличие вариантов в выборе характера учета информации. Первый вариант характеризуется плавным старением информации: более ранней информации придается меньший вес. Второй вариант характеризуется скачкообразным видом старения информации: информации, полученной из фиксированного количества последних импульсов, придается наибольший вес, а более ранней – нулевой (т.е. более ранняя информация не учитывается вообще).

Возмущения реактивности реально содержат как случайные, так и регулярные составляющие. При случайном возмущении меньшее (хотя и не столь существенное) значение среднеквадратического отклонения регулируемого параметра получается при первом варианте AP. При регулярном возмущении в виде скачка реактивности несколько лучшие показатели переходного процесса мощности (перерегулирование и время регулирования) получаются при втором варианте AP.

Уравнения кинетики импульсного реактора периодического действия типа ИБР-2 представлены в виде разностных уравнений, связывающих параметры реактора, соответствующие текущему и предшествующему импульсам мощности, и нелинейных зависимостей энергии импульса мощности и его амплитуды от реактивности. Согласно этим соотношениям создан импульсный реактиметр. Для подавления существенных шумов реактивности, обусловленных конструкцией и принципом действия реактора, использован фильтр, работающий по принципу статистически оптимального алгоритма. Выбрано наилучшее место включения фильтра в блок-схему из двух возможных вариантов. Как и следовало ожидать, для стационарного режима предпочтительнее иметь большой коэффициент сглаживания, для переходного – меньший. В качестве оптимального можно рекомендовать коэффициент сглаживания фильтра в диапазоне 4–8.

Глава 3. Исследование динамики импульсного реактора ИБР-2М

Исследование быстрой мощностной обратной связи (МОС) реактора ИБР-2М необходимо для обоснования надежной и безопасной работы реактора. От характера этой связи зависит, будет ли реактор устойчив или перейдет в режим колебательной неустойчивости. Точные оценки параметров МОС ИБР-2М могут быть получены лишь при анализе периодических колебаний мощности, вызванных периодическими прямоугольными колебаниями реактивности [24]. Изменения реактивности с одного уровня на другой происходят внутри интервалов между соседними импульсами. Из-за этого в каждом периоде колебаний энергия импульсов мощности изменяется сначала скачком, поскольку МОС не успевает проявить себя мгновенно, и лишь затем, в последующих импульсах, под действием МОС. Математическая обработка зарегистрированных периодических колебаний мощности позволяет определить параметры МОС, в том числе, самых быстрых ее составляющих.

В работе представлены результаты первых исследований параметров быстрой мощностной обратной связи ИБР-2М, полученные в результате обработки процессов, зарегистрированных в сентябре 2015 г. Энерговыработка реактора на момент проведения измерений, составила 767 МВт-сут.

3.1 Эксперименты для оценки параметров МОС

Быстрая обратная связь, обусловленная процессами в активной зоне реактора, в полной мере проявляет себя при резком изменении мощности и регистрации мощности в течение примерно 30 с. Однако при резком разовом изменении реактивности можно получить лишь качественную оценку параметров обратной связи, поскольку энергии импульсов мощности присущи большие флуктуации ($\pm 20\%$).

Несравненно более точные оценки могут быть получены при анализе переходных процессов, вызванных периодическими прямоугольными колебаниями реактивности. Изменения реактивности с одного уровня на другой осуществляются в течение интервалов между соседними импульсами мощности (менее, чем за 0.2 с). Такие изменения в импульсной системе аналогичны скачкообразным изменениям в непрерывной системе. На ИБР-2М предусмотрена возможность осуществлять прямоугольные колебания реактивности разного периода (до нескольких минут).

Каждому периоду зарегистрированного переходного процесса энергии присущи большие флуктуации. Усреднением энергии по многим периодам путем наложения периодов друг на друга делается переход к процессу с резко уменьшенными флуктуациями энергии импульсов. Для анализа используется именно этот процесс, который условно назовем процессом с усредненным периодом. В этом усреднении заключается смысл метода периодических колебаний реактивности. Важно, что этот метод позволяет обходиться колебаниями реактивности достаточно малой амплитуды, что в свою очередь, обеспечивает безопасность измерений.

Изменение реактивности с одного уровня на другой осуществлялись посредством перемещения стержня автоматического регулятора (AP), который был выведен из контура автоматического регулирования и использовался как задатчик возмущающей реактивности. Величина вносимой стержнем AP реактивности вычислялась по характеристике "перемещение – реактивность", полученной в результате экспериментов, проведенных во время физического пуска реактора (декабрь 2010 – февраль 2011 г.) [4].

В процессе измерений осуществлялась регистрация амплитуды каждого импульса мощности с трех независимых каналов контроля мощности. Время регистрации не превышало 30 минут. В качестве исходной принята амплитуда, усредненная по трем каналам. Одновременно регистрировалось положение AP, а также положение промежуточного регулятора, чтобы при последующей обработке использовать только те фрагменты зарегистрированного процесса мощности, которые обусловлены лишь изменением положения AP. Регулируемым параметром реактора является относительная амплитуда импульса мощности. Поскольку она равна относительной энергии импульса, для удобства анализа процессов в реакторе в качестве регулируемого параметра использована именно относительная энергия импульса мощности.

Измерения проведены для четырех уровней средней мощности (0,5; 1.0; 1,5 и 2,0 МВт) при штатном расходе натрия через активную зону 100 м³/час. Период опроса амплитуд составлял 0,2 с, всех других параметров – 0,1 с.

На рис.3.1. приведен характерный вид колебаний задающей реактивности, обусловленной AP, суммарной возмущающей реактивности (AP плюс шум) и относительного отклонения энергии импульсов мощности. Шум реактивности вычислен по зарегистрированным отклонениям амплитуд импульсов мощности при работе реактора в режиме саморегулирования при средней мощности 2 MBT.



Рисунок 3.1 — Реактивность AP r_0 в виде прямоугольных колебаний амплитудой 0,1 β_{μ} с периодом 32 с (*a*), суммарная реактивность *r* AP и шума (*б*) и относительное отклонение энергии импульсов мощности Δe_{μ} (*b*)

3.2 Оценка структуры и параметров мощностной обратной связи (MOC)

Оценка МОС проводилась в режим саморегулирования (реактор ИБР-2М работал без автоматического регулятора). Автоматический регулятор (AP), выведенный из контура регулирования, использовался в качестве задатчика реактивности. Задающая реактивность изменялась с одного уровня на другой за интервал времени между соседними импульсами мощности (для импульсного реактора это эквивалентно скачку реактивности). Регистрировалась последовательность энергий импульсов мощности и вычислялись значения относительных отклонений энергий импульсов мощности Δe_{un} . Использовалось как однократное изменение уровня реактивности, так и периодическое, в частности, с таким периодом колебаний, что в конце полупериода реактор выходил на практически установившийся уровень мощности.

Вычислялись значения относительных отклонений полной энергии импульсов мощности Δe_n (дискретный входной сигнал блока MOC). Используя уравнения кинетики импульсного реактора с заменой уравнения (2.13) уравнением (2.23), вычислялись отклонения реактивности r_{mn} (дискретный входной сигнал реактора нулевой мощности). Из соотношения (2.25) по известной задающей реактивности r_{RTn} и вычисленной реактивности r_{mn} вычислялся выходной сигнал MOC:

$$r_{Tn} = r_{RTn} - r_{mn}.$$
 (3.1)

3.3 Частотная передаточная функция обратной связи

Анализ МОС был продолжен частотным методом. Были вычислены спектры $\Delta e^*(j\overline{\omega})$ и $r_T^*(j\overline{\omega})$ дискретных сигналов Δe_n и r_{Tn} , а по ним дискретная частотная передаточная функция МОС:

$$W_T^*(j\overline{\omega}) = \frac{r_T^*(j\overline{\omega})}{\Delta e^*(j\overline{\omega})} = \operatorname{Re}W_T^*(j\overline{\omega}) + j\operatorname{Im}W_T^*(j\overline{\omega}), \qquad (3.2)$$

где $\operatorname{Re}W_T^*(j\overline{\omega})$ и $\operatorname{Im}W_T^*(j\overline{\omega})$ - соответственно ее действительная и мнимая части (иначе называемые вещественной и мнимой дискретными частотными характеристиками), $\overline{\omega}$ - круговая частота в относительных единицах равная

$$\overline{\omega} = \omega T_{\scriptscriptstyle \rm M} \tag{3.3}$$

где, $T_{\rm m}$ - период импульсов в с, $\omega = 2\pi/T_{\rm m}$ - круговая частота в с⁻¹.

Дискретные частотные характеристики являются периодическими функциями частоты. Их период равен $2\pi/T_{\mu}$, если пользоваться частотой ω , или 2π , если пользоваться относительной частотой $\overline{\omega}$ (диапазон $\overline{\omega}$ от 0 до π). Входным сигналом блока МОС, изображенного на рис. 3.2, принято относительное отклонение полной энергии за период импульса мощности $\Delta e_n = \Delta E_n/E^0$. Отклонение реактивности МОС зависит от отклонения температуры топлива от ее базового значения. Отклонение же температуры зависит напрямую от отклонения полной энергии за период импульсов мощности ΔE_n , а не от относительного отклонения $\Delta e_n = \Delta E_n/E^0$.

$$\Delta e_n = \Delta E_n / E^0 \xrightarrow{} \Delta E_n \xrightarrow{} W_{T\Delta E}^* \xrightarrow{} W_T^*$$

Рисунок 3.2 — Блок мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2М

МОС с дискретной передаточной функцией W_T^* представлена в виде двух составляющих: усилительного звена, преобразующего входной сигнал $\Delta e_n = \Delta E_n/E^0$ в сигнал ΔE_n (его передаточная функция равна E^0) и составляющая МОС с дискретной передаточной функцией $W_{T\Delta E}^*$. Передаточной функцией $W_{T\Delta E}^*$ целесообразнее пользоваться, когда необходимо сравнивать дискретные передаточные функции МОС, соответствующие разным средним мощностям реактора (следовательно, разным значениям E^0). Сейчас именно она представляет для нас интерес. Дискретная частотная передаточная функция МОС по относительному отклонению энергии есть произведение (см. рис. 3.2):

$$W_T^*(j\overline{\omega}) = E^0 W_{T\Delta E}^*(j\overline{\omega}).$$
(3.4)

Следовательно, дискретная частотная передаточная функция МОС по абсолютному отклонению энергии в E^0 раз меньше:

$$W_{T\Delta E}^{*}(j\overline{\omega}) = \frac{r_{T}^{*}(j\overline{\omega})}{\Delta E^{*}(j\overline{\omega})} = \frac{1}{E^{0}}W_{T}^{*}(j\overline{\omega}).$$
(3.5)

Аналогично связаны и вещественные характеристики, соответствующие этим частотным передаточным функциям:

$$\operatorname{Re}W_{T\Delta E}^{*}(j\overline{\boldsymbol{\omega}}) = \frac{1}{E^{0}}\operatorname{Re}W_{T}^{*}(j\overline{\boldsymbol{\omega}}).$$
(3.6)

3.4 Импульсная переходная характеристика МОС

В разделе, посвященном теории управления, приводилась формула для вычисления дискретной импульсной переходной характеристики системы по вещественной дискретной частотной характеристике. Воспользуемся этой формулой и вычислим дискретную импульсную переходную характеристику МОС:

$$w_{T\Delta En} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \operatorname{Re} W_{T\Delta E}^*(j\overline{\omega}) \cos(j\overline{\omega}n) d\overline{\omega}.$$
(3.7)

Характеристика $w_{T\Delta En}$ - это отклонения реактивности МОС в дискретные моменты времени $t = 0; 1T_n; 2T_n; 3T_n; \ldots$, вызванные бесконечно узким одиночным импульсом мощности единичной площади, поданным на вход МОС в момент времени t = 0. Значения реактивности именно в эти дискретные моменты времени влияют на динамику реактора. Поэтому $w_{T\Delta En}$ называется дискретной импульсной переходной характеристикой. Разумеется, реактивность МОС, обусловленная одиночным импульсом мощности, представляет собой непрерывную функцию времени. Она называется импульсной переходной характеристикой и является огибающей дискретной импульсной переходной характеристики.



Рисунок 3.3 — Импульсная переходная характеристика МОС, т.е. отклонение реактивности МОС в $\beta_{\rm u}$ /МДж, вызванное одиночным импульсом мощности в момент времени t = 0. $n = t/T_{\rm u}$ - безразмерное время, $T_{\rm u}$ - период импульсов мощности

Описание МОС линейными уравнениями и, следовательно, правомерность использования передаточной функции МОС являются справедливыми в первом приближении. Поэтому характеристику $w_{T\Delta En}$ следует рассматривать как отклонение реактивности r_{Tn} , вызванное импульсом мощности достаточно малой площади (при которой не нарушается линейность соотношений), но нормированную на импульс мощности площадью 1 МДж.

В качестве примера на рис. 3.3 показана импульсная переходная характеристика МОС, вычисленная по формуле (3.7) для одного из проведенных экспериментов при средней мощности реактора 2 МВт (2015 г.).

Для всех вычисленных импульсных переходных характеристик MOC, соответствующих рабочему диапазону средней мощности реактора ИБР-2 (от 1.5 до 2 MBт) характерно сначала резкое падение, затем некоторый подъем, после чего опять падение, но несравненно более медленное (рис. 3.3). Естественно, без учета этой особенности импульсной переходной характеристики ее предельно упрошено можно описать одной экспонентой. Очевидно, что при учете этой особенности импульсную переходную характеристику MOC следует описать, по меньшей мере, суммой трех экспонент: двух с положительным знаком и одной с отрицательным. Поскольку экспонента является импульсной переходной характеристикой апериодического звена, то модель MOC можно представить в виде трех апериодических звеньев, соединенных параллельно.

Итак, на вход каждого *j*-го апериодического звена (j = 1, 2, 3) подаются бесконечно узкие импульсы мощности с периодом $T_{\rm u}$. При этом реактивность MOC, обусловленная текущим импульсом мощности, не успевает проявить себя в этом текущем импульсе мощности, она влияет на формирование лишь последующих импульсов мощности. Учитывая это, запишем разностное уравнение, связывающее сигнал на выходе r_{Tjn} в момент, соответствующий *n*-му импульсу мощности, со значением выходного сигнала r_{Tjn-1} и площадью импульса полной мощности ΔE_{n-1} , которые соответствуют (n-1)-му импульсу мощности:

$$r_{Tjn} = \left(r_{Tjn-1} + \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}}\Delta E_{n-1}\right) \exp\left(-\frac{T_{\scriptscriptstyle \rm H}}{T_{Tj}}\right),\tag{3.8}$$

где k_{Tj} и T_{Tj} - коэффициент передачи и постоянная времени *j*-й составляющей МОС; j = 1, 2, 3 - номер апериодического звена.

Для МОС в целом разностное уравнение примет вид:

$$r_{Tn} = \sum_{j=1}^{3} r_{Tjn} = \sum_{j=1}^{3} \left[\left(r_{Tjn-1} + \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \Delta E_{n-1} \right) \exp\left(-\frac{T_{\mu}}{T_{Tj}} \right) \right].$$
(3.9)

Дискретные частотные передаточные функции МОС $W^*_{T\Delta E}$ и ее параллельных составляющих $W_{T\Delta Ej}$ связаны суммой

$$W_{T\Delta E}^{*}(j\overline{\omega}) = \frac{r_{T}^{*}(j\overline{\omega})}{\Delta E^{*}(j\overline{\omega})} = \sum_{j=1}^{3} W_{T\Delta Ej}^{*}(j\overline{\omega}) = \sum_{j=1}^{3} \frac{r_{Tj}^{*}(j\overline{\omega})}{\Delta E^{*}(j\overline{\omega})},$$
(3.10)

где $r_T^*(j\overline{\omega})$ и $r_{Tj}^*(j\overline{\omega})$ – Фурье-изображения (спектры) дискретных сигналов r_{Tn} и r_{Tjn} соответственно.

Звено с наибольшей постоянной времени создает отрицательную обратную связь, с промежуточной – положительную, с наименьшей – отрицательную, в сумме же – отрицательную.

Дискретная импульсная переходная характеристика w_n каждого апериодического звена МОС используется в расчетах не вся, а за вычетом ее значения k/T, соответствующего n = 0. Учитывая это, для *j*-го звена и для МОС в целом получим:

$$W_{T\Delta Ej}^{*}(j\overline{\omega}) = \frac{r_{Tj}^{*}(j\overline{\omega})}{\Delta E^{*}(j\overline{\omega})} = \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \frac{\exp(-j\overline{\omega})}{\exp\left(\frac{T_{u}}{T_{Tj}}\right) - \exp(-j\overline{\omega})}.$$
(3.11)

$$W_{T\Delta E}^{*}(j\overline{\omega}) = \frac{r_{T}^{*}(j\overline{\omega})}{\Delta E^{*}(j\overline{\omega})} = \sum_{j=1}^{3} \left[\frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \frac{\exp(-j\overline{\omega})}{\exp\left(\frac{T_{\mu}}{T_{Tj}}\right) - \exp(-j\overline{\omega})} \right].$$
 (3.12)

Структурная схема МОС (т.е. соединение звеньев с указанием их передаточных функций) показана на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 — Структурная схема МОС в линейном приближении

При не слишком малых возмущениях реактивности линейной модели МОС уже недостаточно. Это наглядно проявляется в том, что симметричные прямоугольные колебания реактивности вызывают явно несимметричные колебания энергии импульсов мощности, что можно объяснить лишь нелинейностью МОС. В связи с этим структура модели МОС оставлена без изменений, но коэффициенты передачи МОС приняты величинами не постоянными, а зависимыми от различных параметров. У звена с наибольшей постоянной времени коэффициент передачи принят зависимым от реактивности, обусловленной именно этим звеном. Такая зависимость основана на предположении, что эта составляющая реактивности МОС обусловлена расширением топлива (что согласуется с расчетной оценкой) и что реактивность этой составляющей пропорциональна отклонению температуры топлива. У двух других звеньев коэффициенты передачи приняты зависимыми от суммарной реактивности МОС в предположении, что она обусловлена совокупностью различных факторов. Такая зависимость коэффициентов передачи означает дополнительное введение в модель МОС местных обратных связей (рис. 3.5).

$$\Delta E_n/E^0 \xrightarrow{\Delta E_n} \Delta E_{1n} = \Delta E_n(1+c_1r_{T1n}) \xrightarrow{\Delta E_{1n}} W_{T\Delta E1}^* \xrightarrow{r_{T1n}} +$$

$$\Delta E_{2n} = \Delta E_n(1+c_2r_{Tn}) \xrightarrow{\Delta E_{2n}} W_{T\Delta E2}^* \xrightarrow{r_{T2n}} +$$

$$\Delta E_{3n} = \Delta E_n(1+c_3r_{Tn}) \xrightarrow{\Delta E_{3n}} W_{T\Delta E3}^* \xrightarrow{r_{T3n}} +$$

Рисунок 3.5 — Блок-схема нелинейной МОС реактора ИБР-2М: $\Delta E_{1n} \Delta E_{2n}$, ΔE_{3n} – промежуточные переменные, обусловленные нелинейностями коэффициентов передачи

При такой модели МОС ИБР-2 и ИБР-2М при средней мощности 2 МВт получено наилучшее приближение смоделированных переходных процессов к зарегистрированным.

Отклонение реактивности МОС, соответствующее *n*-му импульсу мощности, равно сумме отклонений ее составляющих:

$$r_{Tn} = \sum_{j=1}^{3} r_{Tjn} = \sum_{j=1}^{3} \left[\left(r_{Tjn-1} + \frac{K_{Tjn-1}}{T_{Tj}} \Delta E_{n-1} \right) \exp\left(-\frac{T_{\mu}}{T_{Tj}} \right) \right], \quad (3.13)$$

где ΔE_{n-1} – отклонение полной энергии, а K_{Tjn-1} – нелинейный коэффициент передачи, соответствующие предыдущему импульсу мощности; T_{Tj} – постоянная времени *j*-й составляющей МОС; $T_{\rm u}$ – период импульсов мощности. Коэффициенты K_{Tjn-1} равны

$$K_{T1n-1} = k_{T1} \left(1 + c_1 r_{T1n-1} \right), \qquad (3.14)$$

$$K_{T2n-1} = k_{T2} \left(1 + c_2 r_{Tn-1} \right), K_{T3n-1} = k_{T3} \left(1 + c_3 \Delta r_{Tn-1} \right), \qquad (3.15)$$

где k_T – составляющая коэффициента передачи, не зависящая от реактивности; c – коэффициент нелинейности, учитывающий зависимость K_T от реактивности.

3.5 Основные результаты оценки параметров мощностной обратной связи ИБР-2М

Для определения параметров МОС была создана специальная программа поиска минимума. Обработка данных проводилась в следующем порядке.

- От зарегистрированного переходного процесса (в виде последовательности периодов колебаний), обусловленного прямоугольными колебаниями и шумом реактивности, делался переход к процессу Δe_{un} с усредненным периодом с уменьшенным шумом. В качестве примера на рис. 3.6 показаны по одному периоду зарегистрированного процесса мощности и процесса с усредненным периодом,
- Из общих соображений задавались начальные значения параметров MOC, которые варьировались программой поиска минимума. Для каждого набора параметров вычислялся переходный процесс ∆e_{un}. Вычисления проводились по уравнениям кинетики и MOC, представленным в виде разностных уравнений, связывающих значения переменных, соответствующих текущему (с индексом n) и предшествующему (с индексом n − 1) импульсу мощности.
- 3. Определялись значения параметров МОС, при которых достигалось наилучшее приближение вычисленного переходного процесса мощности к зарегистрированному. В качестве показателя наилучшего

приближения принят минимум среднеквадратического отклонения вычисленного переходного процесса от зарегистрированного $\sigma = \sqrt{N^{-1} \sum_{n=1}^{N} (\Delta e_{un} - \Delta e_{un})^2}$. Здесь и далее переменные, относящиеся к n-му импульсу мощности, помечены индексом n (N – количество импульсов в периоде колебаний). Вычисленное отклонение энергии импульса мощности, соответствующее выбранным параметрам МОС, помечено индексом . Базовые значения переменных помечены верхним индексом 0.



Рисунок 3.6 — Переходные процессы при изменении реактивности: 1 – задающая реактивность r; 2, 3 – относительное отклонение энергии импульсов мощности от среднего уровня Δe_{μ} , соответствующее зарегистрированному процессу и процессу с усредненным периодом; n – номер импульса мощности. Средняя мощность реактора – 2 МВт

Для всего охваченного экспериментом диапазона средних мощностей P^0 (от 0,5 до 2 MBт) хорошее приближение вычисленных переходных процессов к зарегистрированным процессам получено при представлении математической модели MOC в виде параллельного соединения трех линейных апериодических звеньев с коэффициентами передачи k_{Tj} и постоянными времени T_{Tj} . При мощностях меньших номинальной (от 0,5 до 1,5 MBт) две наиболее быстрые составляющие MOC практически компенсируют друг друга, и MOC упрощенно может быть представлена одним апериодическим звеном. Оценка параметров математической модели MOC ИБР-2М в виде трех апериодических звеньев приведена в табл. 3.

$P^0,$	Параметр		j		
МВт			2	3	
	Суммарный коэффициент передачи $\sum_j k_{Tj}, \beta_{\mu}/\mathrm{MBr}$		-6,85		
0,5	Коэффициент передачи $k_{Tj}, \beta_{\mu}/\mathrm{MBr}$	-6,99	1,75	-1,61	
	Постоянная времени T_{Tj} , с	6,0	0,22	0,41	
1,0	Суммарный коэффициент передачи $\sum_j k_{Tj}, \beta_{\mu}/\mathrm{MBr}$		-5,54		
	Коэффициент передачи $k_{Tj}, \beta_{\mu}/\mathrm{MBr}$	-5,61	1,16	-1,09	
	Постоянная времени T_{Tj} , с	6,9	0,40	0,37	
1,5	Суммарный коэффициент передачи $\sum_j k_{Tj}, \beta_{\mu}/\mathrm{MBT}$		-5,52		
	Коэффициент передачи $k_{Tj}, \beta_{\mu}/\text{MBt}$	-5,87	1,31	-0,96	
	Постоянная времени T_{Tj} , с	8,2	1,33	1,13	
2,0	Суммарный коэффициент передачи $\sum_j k_{Tj}, \beta_{\mu}/\text{MBt}$		-5,14		
	Коэффициент передачи $k_{Tj}, \beta_{\mu}/\text{MBt}$	-5,91	1,59	-0,82	
	Постоянная времени T_{Tj} , с	7,6	1,02	0,46	

Таблица 3 — Параметры МОС ИБР-2М в представлении трех линейных апериодических звеньев при разных уровнях мощности

На рис.3.7 представлены зарегистрированные и вычисленные переходные процессы, соответствующие выбранным параметрам МОС в трехкомпонентной модели при уровнях средней мощности 0,5; 1,5 и 2 МВт.

64



Рисунок 3.7 — Переходные процессы, вызванные прямоугольных колебаниях задающей реактивности при разных средней мощности реактора.

а) $P^0 = 0,5$ MB
т; б) $P^0 = 1,5$ MB
т; в) $P^0 = 2,0$ MB
т. Слева – задающая

реактивность r_0 ; периоды колебаний относительного отклонения энергии импульсов, зарегистрированного $\Delta e_{\mathbf{u}}$ (2) и вычисленного $\Delta e_{\mathbf{u}a}$ (3). Справа – задающая реактивность ; вычисленная суммарная реактивность МОС r_T и её составляющие r_{T1} , r_{T2} и r_{T3}

3.6 Линеаризованные уравнения импульсного реактора, передаточные функции

Для исследования устойчивости нелинейной системы пользуются соответствующими ей линеаризованными уравнениями. Для исследования динамики реактора использовался частотной метод. Реактор ИБР-2М без автоматического регулятора представлен в виде линеаризованной замкнутой одноконтурной системы с отрицательной обратной связью.

Задачу линейной устойчивости удобно сформулировать в терминах передаточных функций с помощью структурных схем. Передаточная функция определяется как отношение преобразований Лапласа выходного и входного сигналов и равна преобразованию Лапласа импульсной характеристики. Переходная характеристика линейной системы определяется полюсами передаточной функции (корни характеристического уравнения). За более подробными сведениями читатель может обратиться к книгам по теории автоматического регулирования [47, 48]и [14, 16, 17, 23] по принципу реакторных систем.

Мощностная обратная связь. Нелинейной МОС соответствует уравнение (3.13) с переменными коэффициентами передачи K_{Tj} . Линеаризованной МОС соответствует подобное уравнение, но с постоянными коэффициентами передачи k_{Tj} :

$$r_{Tn} = \sum_{j=1}^{3} r_{Tjn} = \sum_{j=1}^{3} \left[\left(r_{Tjn-1} + \Delta E_{n-1} \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \right) \cdot \exp(-T_{\mathtt{M}}/T_{Tj}) \right]$$
(3.16)

Уравнение (2.38) превращается в уравнение (2.41) при $c_j = 0$. Аналогично при $c_j = 0$ блок-схема нелинейной МОС (рис. 3.5) переходит в блок-схему линейной МОС (рис. 3.4).

Реактор нулевой мощности. В нелинейном уравнении кинетики (2.23) $E_{\mu n}/E_{\mu}^{0} = (S_{n}/S^{0}) \exp(r_{mn})$ разложим экспоненту в ряд Тейлора и отбросим высшие производные:

$$\frac{E_{\scriptscriptstyle \rm H}n}{E_{\scriptscriptstyle \rm M}^0} = \frac{S_n}{S^0} \left(1 + r_{mn}\right).$$

Запишем формулу в следующем виде:

$$\frac{E_{\text{III}n}}{E_{\text{III}}^0} - 1 = \left(\frac{S_n}{S^0} - 1 + 1\right) (1 + r_{mn}) - 1.$$

Воспользовавшись обозначениями (2.25) для относительных отклонений переменных $(E_{un}/E_u^0) - 1 = \Delta e_{un}$ и $(S_n/S^0) - 1 = \Delta s_n$ и пренебрегая произведением $(S_n/S^0)r_{mn}$ как величиной второго порядка малости из формулы получим

$$\Delta e_{\mathbf{M}n} = \Delta s_n + r_{mn}.$$

В других уравнениях кинетики относительные переменные заменим относительными отклонениями. Уравнение (2.11) $E_n/E^0 = E_{\mu}/E^0 + E_{\Phi}/E^0$ для базового режима: примет вид $E^0/E^0 = E_{\mu}^0/E^0 + E_{\Phi}^0/E^0$. Вычитая последнее уравнение из предыдущего и учитывая соотношения (2.18) и (2.19), получим

$$\Delta e_n = (1 - k_{\Phi})\Delta e_{un} + k_{\Phi}\Delta e_{\Phi n} = (1 - k_{\Phi})\Delta e_{un} + k_{\Phi}\Delta s_n.$$

Поступая аналогичным образом с уравнениями (2.14)–(2.16), получим уравнения кинетики для малых отклонений:

$$\Delta e_{\mathtt{M}n} = \Delta s_n + r_{mn},\tag{3.17}$$

$$\Delta e_n = (1 - k_{\Phi}) \Delta e_{un} + k_{\Phi} \Delta s_n, \qquad (3.18)$$

$$\Delta s_n = \sum_i \Delta s_{in} = \sum_i \left[\left(\Delta s_{in-1} + \mu_i \lambda_i \frac{E^0}{S^0} \Delta e_{n-1} \right) \exp(-\lambda_i T_{\scriptscriptstyle \rm II}) \right], \qquad (3.19)$$

где коэффициенты k_{Φ} и E^0/S^0 определяются формулами

$$k_{\Phi} = \frac{\beta T_{\scriptscriptstyle \rm II}}{\Delta k_{\rm IIO} - \varepsilon_m^0} \sum_i \frac{\mu_i \lambda_i}{\exp(\lambda_i T_{\scriptscriptstyle \rm II}) - 1},\tag{3.20}$$

$$\frac{E^0}{S^0} = \left(\sum_i \frac{\mu_i \lambda_i}{\exp(\lambda_i T_{\scriptscriptstyle \rm H}) - 1}\right)^{-1}.$$
(3.21)

Формула (2.45) повторяет формулу (2.18), а формула (2.46) вытекает из выражения (2.17).

Уравнение (2.44) связывает относительное отклонение интенсивности запаздывающих нейтронов $\Delta s_n = \Delta S_n/S^0$, соответствующее *n*-му (текущему) импульсу мощности, с аналогичным относительным отклонением Δs_{n-1} и относительным отклонением полной энергии Δe_{n-1} , соответствующими (n-1)-му (предыдущему) импульсу мощности.

Ранее при рассмотрении МОС было показано, что разностному уравнению (2.34) соответствует дискретная частотная передаточная функция (2.37). Аналогично для запаздывающих нейтронов разностному уравнению (2.44), подобному уравнению (2.34), соответствует следующая дискретная частотная передаточная функция, подобная выражению (2.37):

$$W_{S}^{*}(j\overline{\omega}) = \frac{\Delta s^{*}(j\overline{\omega})}{\Delta e^{*}(j\overline{\omega})} = \frac{1}{\sum_{i} \frac{\mu_{i}\lambda_{i}}{\exp(\lambda_{i}T_{\mu})-1}} \sum_{i} \mu_{i}\lambda_{i} \frac{\exp(-j\overline{\omega})}{\exp(\lambda_{i}T_{\mu}) - \exp(-j\overline{\omega})}.$$
 (3.22)

Линеаризованным уравнениям МОС (2.43) и кинетики (2.42) – (2.44) импульсного реактора ненулевой мощности соответствует структурная схема, показанная на рис. 3.8.

Дискретные частотные передаточные функции $W^*_{T\Delta E}(j\overline{\omega})$ и $W^*_S(j\overline{\omega})$ вычисляются по формулам (2.37) и (2.47). Дискретная частотная передаточная функция $W^*_E(j\overline{\omega})$ блока, преобразующего сигнал $\Delta e_{un} = \Delta E_{un}/E^0_{\mu}$ в сигнал $\Delta e_n = \Delta E_n/E^0$, вычисляется, как следует из рис. 3.8, по формуле

$$W_E^*(j\overline{\omega}) = \frac{\Delta e^*(j\overline{\omega})}{\Delta e_{\mu}^*(j\overline{\omega})} = \frac{1 - k_{\Phi}}{1 - k_{\Phi}W_S^*(j\overline{\omega})}.$$
(3.23)

Реактор ненулевой мощности должен удовлетворять важнейшему требованию – устойчивости в режиме саморегулирования. Для оценки устойчивости реактора удобно воспользоваться критерием Найквиста. Для этого реактор следует представить в виде одноконтурной замкнутой системы с отрицательной обратной связью, и судить об устойчивости замкнутой системы по частотным характеристикам разомкнутой системы.



Рисунок 3.8 — Структурная схема импульсного реактора ненулевой мощности в линейном приближении

Прямой канал замкнутой системы примем единичным (канал от r_{RTn} к Δe_{un}). Тогда канал обратной связи будет представлять собой блок, включающий все указанные на рис. 3.8 элементы, и дискретная частотная передаточная функция разомкнутой системы будет равна

$$W_{RTpa3}^{*}(j\overline{\omega}) = W_{E}^{*}(j\overline{\omega}) \left[E^{0}W_{T\Delta E}^{*}(j\overline{\omega}) - W_{S}^{*}(j\overline{\omega}) \right].$$
(3.24)

Дискретная частотная передаточная функция реактора ненулевой мощности в целом (как замкнутой системы) равна

$$W_{RT}^*(j\overline{\omega}) = \frac{\Delta e_{\mathrm{II}}(j\overline{\omega})}{r_{RT}(j\overline{\omega})} = \frac{1}{1 + W_E^*(j\overline{\omega}) \left[E^0 W_{T\Delta E}^*(j\overline{\omega}) - W_S^*(j\overline{\omega})\right]}.$$
(3.25)

3.7 Устойчивость импульсного реактора ненулевой мощности

Итак, для оценки устойчивости реактора ненулевой мощности следует построить на комплексной плоскости амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ) разомкнутой системы, т.е. график дискретной частотной передаточной функции

$$W_{RTpa3}^{*}(j\overline{\omega}) = \operatorname{Re}W_{RTpa3}^{*}(j\overline{\omega}) + j\operatorname{Im}W_{RTpa3}^{*}(j\overline{\omega})$$
(3.26)

Вместо АФЧХ можно использовать амплитудную и фазовую логарифмические частотные характеристики разомкнутой системы.



Рисунок 3.9 — Амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы при представлении реактора без автоматического регулятора в виде одноконтурной замкнутой системы.

Средней мощности реактора: 0,5 (1); 1 (2); 1,5 (3) и 2 МВт (2)

В качестве примера на рис. 3.9 показана АФЧХ разомкнутой системы, соответствующая модели реактора ИБР-2М.

 $A\Phi$ ЧХ разомкнутой системы не охватывает точку на комплексной плоскости с координатами -1, j0. Следовательно, реактор ИБР-2М в режиме саморегулирования устойчив. Его запасы устойчивости при указанных параметрах МОС вполне достаточные (рис. 3.9 справа).

Запас устойчивости по амплитуде и фазе оба умещается при увеличение средней мощности импульсного реактора ИБР-2М. На рис. 3.10 показаны зависимости запасов по амплитуде и фазе от средней мощности импульсного реактора ИБР-2М.



Рисунок 3.10 — Зависимости запас устойчивости по амплитуде (*a*) и по фазе (*б*) от средней мощности импульсного реактора ИБР-2М

3.8 Устойчивость импульсного реактора с автоматическим регулятором

На рис. 3.11 изображена блок-схема замкнутой системы управления "регулятор – реактор" для режима стабилизации. Выходным сигналом системы управления является относительное отклонение энергии каждого (*n*-го) импульса мощности от его базового значения $\Delta e_{\text{ил}} = (E_{\text{ил}} - E_{\text{и}}^0) = \Delta E_{\text{ил}}/E_{\text{и}}^0$, а его задающее (желаемое) значение $\Delta e_{\text{изn}} = (E_{\text{ил}} - E_{\text{и}}^0) = 0$ является входным сигналом. На схеме указан также возмущающий сигнал r_{Fn} (реактивность вносимая извне).



Рисунок 3.11 — Блок-схема импульсного реактора с автоматическим регулятором для режима стабилизации: A – автоматический регулятор; RT – реактор ненулевой мощности; R0 – реактор нулевой мощности; T – блок мощностной обратной связи, обусловленной разогревом реактора

На рис 3.12 показана структурная схема замкнутой системы управления "регулятор – реактор" в линейном приближении для режима стабилизации.

Нелинейная модель реактора получена на основании наилучшего приближения смоделированных переходных процессов к зарегистрированным. Для моделирования переходных процессов, в том числе в нештатных режимах, целесообразно использовать именно ее. Линейная модель предназначена, в первую очередь, для оценки устойчивости реактора.



Рисунок 3.12 — Структурная схема линейной модели импульсного реактора с автоматическим регулятором

Используя рис. 3.12, нетрудно записать различные дискретные передаточные функции реактора с регулятором, в частности, передаточные функции замкнутой системы регулирования относительно задающего входного сигнала W_{ee}^* и относительно возмущения реактивности W_{eF}^* :

$$W_{ee}^{*}(j\overline{\omega}) = \frac{\Delta e_{\scriptscriptstyle \rm I\!I}^{*}(j\overline{\omega})}{\Delta e_{\scriptscriptstyle \rm I\!I\!I}^{*}(j\overline{\omega})} = \frac{W_{A}^{*}(j\overline{\omega})W_{RT}^{*}(j\overline{\omega})}{1 + W_{A}^{*}(j\overline{\omega})W_{RT}^{*}(j\overline{\omega})},\tag{3.27}$$

$$W_{eF}^{*}(j\overline{\omega}) = \frac{\Delta e_{\mu}^{*}(j\overline{\omega})}{r_{F}^{*}(j\overline{\omega})} = \frac{W_{RT}^{*}(j\overline{\omega})}{1 + W_{A}^{*}(j\overline{\omega})W_{RT}^{*}(j\overline{\omega})}.$$
(3.28)



Рисунок 3.13 — Амплитудно-фазовые частотные характеристики разомкнутой системы "регулятор – реактор" для двух значений параметра скорости АР Δ=0,05 (*a*) и Δ=0,2 (*б*) при разных значениях коэффициента сглаживания фильтра *q*.

$$q=1\ (1),\,q=4\ (2),\,q=8\ (3),\,q=16\ (4)$$
и $q=32\ (5)$

При использовании критерия Найквиста об устойчивости одноконтурной замкнутой системы судят по частотным характеристикам разомкнутой системы, которая получается из замкнутой, если разорвать контур (в каком месте разорвать, не принципиально). Представим реактор с регулятором (рис. 3.12) в виде одноконтурной замкнутой системы, приняв в качестве входного сигнала $\Delta e_{\rm H3}$. Тогда в прямом канале будут последовательно соединенные регулятор и реактор ненулевой мощности, а отрицательная обратная связь будет единичной. В этом случае дискретная частотная передаточная функция разомкнутой системы равна

$$W_{\rm pa3}^*(j\overline{\omega}) = W_A^*(j\overline{\omega})W_{RT}^*(j\overline{\omega})$$
(3.29)

На рис. 3.13 и 3.14 приведены АФЧХ разомкнутой системы, используемые для суждения об устойчивости замкнутой системы "регулятор – реактор" по критерию Найквиста. Эти АФЧХ вычислены по импульсным частотным передаточным функциям $W_{\text{pas}}^*(j\overline{\omega}) = W_A^*(j\overline{\omega})W_R^*(j\overline{\omega})W_\sim^*(j\overline{\omega})$ для первого варианта АР и $W_{\text{pas}}^*(j\overline{\omega}) = W_A^*(j\overline{\omega})W_R^*(j\overline{\omega})$ для второго. Функции $W_A^*(j\overline{\omega}), W_R^*(j\overline{\omega})$ и $W_\sim^*(j\overline{\omega})$ получаются из функций $W_A^*(z), W_R^*(z)$ и $W_\sim^*(z)$ путем замены аргумента $z = \exp(j\overline{\omega})$, где $\overline{\omega} = \omega T_{\mu}$ – безразмерная круговая частота (используется диапазон $0 \leq \overline{\omega} \leq \pi$), ω – круговая частота (с⁻¹), $j = \sqrt{-1}$. Рис. 3.13 иллюстрирует для первого варианта AP влияние на AФЧХ коэффициента сглаживания фильтра q и параметра скорости AP Δ , а рис. 3.14 – влияние количества N усредняемых входных сигналов AP для второго варианта.



Рисунок 3.14 — Амплитудно-фазовые частотные характеристики разомкнутой системы " регулятор – реактор" для второго варианта АР при N=8~(a) и N=16~(6)



Рисунок 3.15 — Запасы по амплитуде (a) и фазе (б). Для первого варианта АР кривые 1 ($\Delta = 0.05$), 2 ($\Delta = 0.1$) и 3 ($\Delta = 0.2$), для второго кривая 4

По АФЧХ, соответствующей тому или иному значению варьируемого параметра q и Δ для первого варианта или N для второго определены запасы устойчивости по амплитуде $a = 1/\overline{0A}$ и по фазе $\Delta \varphi$, равный наименьшему
углу поворота вектора АФЧХ единичной длины до отрицательной действительной полуоси (см. рис. 3.13 и 3.14). На рис. 3.15 показаны зависимости запасов по амплитуде и фазе от варьируемых параметров q и Δ для первого варианта АР и от N для второго.

3.9 Сравнительный анализ динамики импульсных реакторов ИБР-2М и ИБР-2

Из-за отличий активных зон ИБР-2 и ИБР-2М по геометрии и структуре топлива термомеханические процессы в активных зонах реакторов, вызываемые изменениями мощности, отличаются. В связи с этим отличаются структуры и значениях параметров МОС и как следствие, динамика реакторов. Рассмотрению отличий в динамике реакторов ИБР-2 и ИБР-2М, в том числе, в устойчивости, т.е. в степени безопасности, и посвящена в этом под главу. Поскольку опыт эксплуатации ИБР-2 показал, что обратная связь и динамика реактора существенно зависят от энерговыработки, т.е. от выгорания топлива, рассмотрены состояния реакторов, соответствующие начальному периоду эксплуатации, когда влиянием выгорания на динамику реактора можно пренебречь.

В общем случае мощностной эффект реактивности определяется как изменение реактивности при изменении мощности реактора при неизменных значениях входной температуры и расхода теплоносителя (натрия). Для изучения мощностных эффектов использована методика исследования переходных процессов мощности при преднамеренных периодических прямоугольных колебаниях реактивности [28].

В процессе экспериментов на реакторах ИБР-2 и ИБР-2М регистрировались последовательности энергии импульсов мощности, вызванные этими колебаниями реактивности при работе реакторов в режиме саморегулирования.

Для реакторов ИБР-2 и ИБР-2М были получено оценки параметров МОС для разных уровне среднее мощности, том числе 2 МВт, [30], [36] и [40]. На рис. 3.16 показаны изменение энерговыработки в зависимости от времени работы ИБР-2 и ИБР-2М и изменение суммарного коэффициент передачи МОС в зависимости от энерговыработки. Из рис.3.16 видно, что полный коэффициент



Рисунок 3.16 — Энерговыработки импульсных реакторов ИБР-2 (•) и ИБР-2М (•) в зависимости времени работы реактора (*a*) и коэффициент мощностной обратной связи ИБР-2 (*k_T*) в зависимости от энерговыработки (*б*). Энерговыработка равна ~850 МВт·сут

мощностной обратной связи $k_T = \sum_{j=1}^3 k_{Tj}$ в некоторые моменты эксплуатации ИБР-2 довольно сильно меняется в сторону ослабления обратной связи. Фактически это означает, что каждому реакторному циклу соответствует свой уменьшающийся по модулю коэффициент передачи. Это приводит к тому, что динамика реактора в процессе его эксплуатации меняется, а запас устойчивости уменьшается. Такой же характер изменения динамики можно ожидать и для ИБР-2М. Поэтому для сравнительной оценки динамики реакторов выбирались состояния с близкими и небольшими значениями энерговыработки: на уровне ~850 МВт.сут.

Нужно также отметить, что на динамику реактора влияет и расход теплоносителя через АЗ. Поэтому при сравнении динамического состояния реакторов расход натрия через АЗ соответствовал значениям, принятым для эксплуатационного (номинального) режима (см. табл.4).

Таблица 4 — Параметры ИБР-2 и ИБР-2М на момент сравнения динамики реакторов при номинальной мощности 2 МВт

Параметр	ИБР-2, 1988	ИБР-2М, 2015
Энерговыработка, МВт·сут	~ 900	$\sim\!\!850$
Расход теплоносителя АЗ, м ³ /ч	90	100

74

На основе данных по переходным процессам изменения энергии импульсов, зарегистрированных при воздействии периодических возмущений прямоугольных колебаний реактивности, были получены с помощью соответствующей математической обработки импульсные характеристики МОС. Последние представляют собой изменение реактивности МОС под воздействием одного импульса мощности в виде дельта-функции, т.е. бесконечно узкого импульса единичной площади (1 МДж).



Рисунок 3.17 — Переходные процессы изменения энергии импульсов реакторов ИБР-2 (a) и ИБР-2М (б) при прямоугольных колебаниях задающей реактивности при средней мощности 2,0 МВт.

1 – задающая реактивность (r_0) ; 2, 3 – соответственно, относительное отклонение энергии импульса мощности зарегистрированное Δe_{un} и вычисленное Δe_{uan} . n – номер импульсов

Импульсная характеристика быстрой части мощностного эффекта реактивности ИБР-2 обычно представляется в виде трех-экспоненциальной зависимости от 0,2 до 12 с. Сумма трех мощностных коэффициентов обратной связи дает быстрый асимптотический коэффициент реактивности.

Значения параметров МОС реакторов ИБР-2 и ИБР-2М сведены соответственно в таблице 5. На рис.3.18 показаны импульсные переходные характеристики МОС.

Первое указание на различие динамики реакторов было получено при сравнении реакции реакторов на симметричные возмущения реактивности в большую и меньшую сторону относительно равновесного критического

Таблица 5 — Параметры МОС ИБР-2М при штатном расходе натриевого теплоносителя через активную зону 100 м³/ч (2015 г.) и параметры МОС ИБР-2 при штатном расходе теплоносителя 90 м³/ч (1988 г.) при номинальной средней мощности 2 МВт и энерговыработке ~ 850 МВт·сут

	ИБР-2М			ИБР-2		
Параметр	Номер компонентов МОС, j					
	1	2	3	1	2	3
Коэффициент передачи $k_{Tj}, \beta_{\mu}/\text{MBt}$	-5,91	1,59	-0,82	-6,98	2,16	-0,43
Постоянная времени T_{Tj} , с	7,60	1,02	0,46	9,00	3,00	0,24
Коэффициент нелинейности c_j, β_{μ}^{-1}	0	0	0	-0,50	0,60	-2,20
Суммарный коэффициент передачи	-5,14			-5,25		
$\sum_{j} k_{Tj}, \beta_{\mu}/\mathrm{MBT}$						



Рисунок 3.18 — Импульсные переходные характеристики МОС ИБР-2 (1) и ИБР-2М (2) при номинальной средней мощности реакторов 2 МВт и энерговыработке 850–900 МВт·сут. *n* – номер импульсов

состояния. В ИБР-2М симметричные колебания реактивности вызывают симметричные колебания мощности. Напротив, в ИБР-2 реакция на симметричные колебания вызывали несимметричные колебания мощности. Таким образом, мощностная обратная связь в ИБР-2 - нелинейная, а в ИБР-2М - может быть описана линейными уравнениями [30].

На рис. 3.19 показаны амплитудно-фазовые частотные характеристики разомкнутой части системы при представлении реактора в режиме саморегулирования в виде одноконтурной замкнутой системы с отрицательной связью на мощности 2,0 МВт.



Рисунок 3.19 — Амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы при представлении реакторов ИБР-2 (1) и ИБР-2М (2) без автоматического регулятора в виде одноконтурной замкнутой системы при средней мощности 2 МВт

Справа более детально представлен участок характеристики вблизи нуля

Блок запаздывающих нейтронов формирует положительную обратную связь. Блок МОС формирует в целом отрицательную обратную связь. На рис. 3.19 показано амплитудно-фазовая частотная характеристика линеаризованной МОС ИБР-2 и ИБР-2М. Эти характеристики отражают зависимость реактивности МОС в долях от энергии импульса мощности в МДж. При нулевой частоте значение амплитудной частотной характеристики МОС равно $\sum_{j} (k_{Tj}/T_{Tj}) / (1 - \exp(-T_{u}/T_{Tj}))$ или примерно $\sum_{j} (k_{Tj}/T_{u})$.

3.10 Выводы к Главе III

На основе анализа переходных процессов мощности, обусловленных прямоугольными колебаниями реактивности при работе импульсного реактора ИБР-2М в режиме саморегулирования, оценены значения параметров математической модели МОС.

Как было сказано выше, конструктивно активная зона ИБР-2М отличается от ИБР-2 тем, что сплошь заполнена тепловыделяющими элементами, в то время как в центре активной зоны ИБР-2 была пустая полость. Видимо,

77

вследствие этого симметричные колебания реактивности вызывали в реакторе ИБР-2 несимметричные колебания мощности, а в ИБР-2М - симметричные. Это позволило описать мощностную обратную связь реактора ИБР-2М тремя линейными дифференциальными уравнениями первого порядка, в то время как МОС ИБР-2 необходимо было описывать тремя нелинейными уравнениями. Наиболее вероятная физическая интерпретация результатов обработки выглядит следующим образом. Самая медленная компонента обратной связи связана с топливной составляющей (аксиальное расширение топлива), остальные – натриевые. Положительная обратная связь как часть натриевых эффектов обусловлена, вероятнее всего, термомеханическими деформациями топливных элементов через градиент температуры натрия и, как видно из табл.3.2, для ИБР-2М проявляется в меньшей степени. В тоже время, из рис.3.18 видно, что полная импульсная характеристика обратной связи для ИБР-2М находится гораздо дальше от положительных значений реактивности чем для ИБР-2. Т.е. по сравнению с ИБР-2 при номинальной мощности реактор ИБР-2М более устойчив. При этом полные коэффициенты быстрой мощностной обратной связи в пределах ошибки практически равны друг другу по модулю (см. табл.3.3). Поэтому использование критерия устойчивости по полному коэффициенту обратной связи не совсем корректно, поскольку не учитывает "тонкую" внутреннюю структуру обратной связи, в которой наряду с отрицательными присутствуют также и положительные компоненты.

Более точные результаты устойчивости дает использование частотного критерия Найквиста. Из сравнения амплитудно-фазовых частотных характеристик разомкнутых систем, соответствующих ИБР-2 и ИБР-2М в режиме саморегулирования при мощности 2 МВт, получены следующие значения запасов устойчивости по амплитуде $a = 1/\overline{0A}$ и фазе $\Delta \varphi$ (рис.3.19). Запас по амплитуде для ИБР-2М практически в два раза выше, чем для ИБР-2. Запас по фазе в частотной характеристике для обоих реакторов достаточно большой (для ИБР-2М несколько меньше, чем для ИБР-2: 57,47 и 64,72 соответственно). Можно считать, что при равной энерговыработке запас устойчивости ИБР-2М в целом выше, чем у ИБР-2. Соответственно продолжительность работы реактора ИБР-2М в существующем номинальном режиме: мощность 2 МВт и расход теплоносителя через АЗ 100 м3/час до границы устойчивости, будет дольше по сравнению с ИБР-2. На дополнительную по сравнению с ИБР-2 устойчивость ИБР-2М могло повлиять и повышение расхода теплоносителя через АЗ ИБР-2М (100 м³/час) по сравнению с соответствующим периодом работы ИБР-2 (90 м³/час). Влияние расхода на устойчивость работы ИБР-2М – тема дополнительных исследований. Длительный опыт эксплуатации ИБР-2 показал, что с течением времени происходит существенное изменение параметров МОС, что ведет к изменению запаса устойчивости реактора и его переходных процессов. Из этого опыта следует, что для обеспечения безопасной работы ИБР-2М необходимы периодически повторяемые эксперименты с принудительным возмущением реактивности для оценки и тенденции изменений параметров МОС ИБР-2М в процессе эксплуатации реактора.

Список сокращений и условных обозначений

Параметры

n	плотность нейтронов в реакторе
ρ	реактивность
N_i	количество групп запаздывающих нейтронов
$\beta_i, \ \beta = \sum \beta_i$	соответственно доля запаздывающих нейтронов группы i и
	суммарная
C_i,λ_i	соответственно концентрация и постоянная распада источни-
	ков запаздывающих нейтронов группы i
τ	эффективное время жизни мгновенных нейтронов
t	время
$P = k_n n$	мощность реактора (k_n – коэффициент пропорциональности
	между мощностью и плотностью нейтронов $n)$
$\epsilon = ho - eta$	реактивность на мгновенных нейтронах в абсолютных еди-
	ницах
$S_i = k_n \tau \lambda_i C_i / \beta$	нормированная интенсивность источников запаздывающих
	нейтронов группы i
$S = \sum S_i$	суммарная нормированная интенсивность источников запаз-
	дывающих нейтронов группы <i>і</i>
$\mu_i = p_i / p$	относительная доля запаздывающих неитронов группы і
E	полная энергия ($E = E_{\mu} + E_{\Phi}$)
	энергия в импульсе мощности
E_{Φ}	энергия фона в интервале между импульсами мощности
ϵ_{Φ}	реактивность фона ($\varepsilon_{\Phi} = \varepsilon_m - \Delta k_{\Pi O}$)
ε_m	максимум реактивности в импульсе
$\Delta k_{\Pi O}$	эффективность подвижного отражателя
Ти	период импульсов мощности (для реактора ИБР-2 М $T_{\rm \scriptscriptstyle H}=0,2$
	c)
M	импульсный коэффициент передачи для энергии импульса
	мощности
M_P	импульсный коэффициент передачи для амплитуды импуль-
2	са мощности
З _и	испульсная доля запаздывающих нейтронов (для реактора
	ИБР-2М $\beta_{\rm M} = 1.54 \cdot 10^{-4}$)

$\Delta e, \Delta e_{\scriptscriptstyle \rm M}$	относительное отклонение энергии и энергии импульсов мощ-
	ности от их среднего значения соответственно
$\Delta E, \Delta E_{\mu}$	отклонение энергии и энергии импульсов мощности от их
	среднего значения соответственно
r	реактивность на мгновенных нейтронах в долях β_{u}
r_T	реактивность мощностной обратной связи в долях eta_{u}
k_{Tj}	коэффициент передачи j -й сосотавляющей МОС
k_T	суммарный коэффициент передачи МОС $(k_T = \sum_{j=1}^3 k_{Tj})$
T_{Tj}	постоянная времени <i>j</i> -й сосотавляющей МОС
C_j	коэффициент нелинейности МОС
r_A	реактивность автоматического регулятора в долях β_{u}
Δ	параметр скорости автоматического регулятора
q	коэффициент сглаживания
r_F	возмущающая реактивность в долях β_{u}
W(z)	импульсная передаточная функция
$W(j\omega)^*$	дискретная частотная передаточная функция
j	$j = \sqrt{-1}$
a	запас устойчивости по амплитуды
$\Delta \phi$	запас устойчивости по фазе

Индексы

- i номер группы запаздывающих нейтронов $(i=1,\!2,\!3,\!...,\!6)$
- п номер импульсов мощности
- j номер составляющей МОС $(j=1,\!2,\!3)$
- А автоматический регулятор
- T мощностная обратная связь, обусловленной разогревом реактора

Аббревиатура

A3	Аварийная защита
АФЧХ	Амплитудно-фазовая частотная характеристика
AP	Автоматический регулятор
БР-5	Исследовательский ядерный реактор на быстрых нейтронах с на-
	триевым теплоносителем
ДПО	Дополнительный подвижный отражатель
ИБР	Импульсный периодический реактор на быстрых нейтронах

ИБР-30	Модернизированный реактор ИБР
ИБР-2	Импульсный периодический реактор на быстрых нейтронах сред-
	ней мощности 2 МВт
ИБР-2М	Модернизированный реактор ИБР-2
ИИН	Импульсный источнок нейтронов
KO	Компенсирующий орган
МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии
MOC	Мощностная обратная связь
ОИЯИ	Объединённый институт ядерных исследований
ОПО	Основный подвижный отражатель
ПО	Подвижный отражатель
ПР	Промежуточный регулятор-Ручной регулятор
СУЗ	Систем управления и защиты
TBC	Тепловыделяющих сборок
ТВЭЛ	Тепловыделяющих элементов
SORA	Импульсный реактор на быстрых нейтронах в Илталя
YAYOI	Импульсный реактор на быстрых нейтронах в Японии

Заключение

Цель работы – моделирование и экспериментальное исследование динамики импульсного реактора ИБР-2М периодического действия (модернизированного реактора ИБР-2) в начале эксплуатации (до энерговыработки 1000 МВт сут) – достигнута.

Основные результаты работы сводятся к следующему.

- Создана дискретная модель импульсного реактора ИБР-2М и осуществлена ее программная реализация с помощью МАТЛАБ для исследования переходных процессов. Линейные элементы модели описаны дискретными функциями, полученными в результате использования z-преобразования. Учтены нелинейные зависимости в блоках кинетики и мощностной обратной связи.
- 2. Проведены тестовые проверки модели применительно к известным переходным процессам в реакторе ИБР-2 и к рассчитанным процессам в реакторе ИБР-2М, показавшие правильность модели. Приемлемость модели подтверждена путем сравнения смоделированных процессов и зарегистрированных при сбросе аварийной защиты, когда регулируемый параметр (относительная амплитуда импульса мощности) уменьшается более чем на четыре порядка. Моделирование проведено при разных уровнях средней мощности (от 0,2 до 2 МВт). Получено хорошее приближение смоделированных процессов к зарегистрированным.
- 3. Проведено моделирование переходных процессов мощности реактора. Дана оценка влияния параметров автоматического регулятора на переходные процессы при регулярном возмущении реактивности, при случайном возмущении реактивности с нормальным законом распределения, а также при реактивности с реальным шумом. В связи с существенным разбросом амплитуд импульсов мощности рассмотрены два варианта автоматического регулятора, удовлетворяющие критерию минимума среднеквадратического отклонения амплитуды будущего импульса мощности на основании информации, полученной в уже прошедших импульсах. Отличие вариантов в выборе характера учета информации состоит в следующем. Первый вариант характеризуется

плавным старением информации: более ранней информации придается меньший вес. Второй вариант характеризуется скачкообразным видом старения информации: информации, полученной из фиксированного количества последних импульсов, придается наибольший вес, а более ранней — нулевой (т.е. более ранняя информация не учитывается вообще).

- 4. Создана модель реактиметра реактора ИБР-2М, использующая разностные уравнения кинетики импульсного реактора периодического действия типа ИБР-2. Разностные уравнения соответствуют традиционным уравнениям кинетики и связывают параметры импульсного реактора, соответствующие текущему и предшествующему импульсам мощности. В модели учтены нелинейные зависимости энергии импульса мощности и его амплитуды от реактивности.
- 5. На основе анализа переходных процессов мощности, обусловленных прямоугольными колебаниями реактивности при работе импульсного реактора ИБР-2М в режиме саморегулирования, оценены значения параметров математической модели МОС.
- 6. Оценены запасы устойчивости по амплитуде и фазе при разных значениях средней мощности реактора ИБР-2М в режиме саморегулирования, а также в режиме автоматического регулирования реактора.
- 7. На основе анализа вычисленных импульсных переходных характеристик и параметров МОС реакторов ИБР-2 и ИБР-2М показано, что оба реактора устойчивы в штатном режиме работы. Запас по амплитуде (т.е. по коэффициенту усиления «реактивность-мощность» реактора) у ИБР-2М по сравнению с ИБР-2 выше практически в два раза. Запасы по фазе (т.е. по фазовому сдвигу между мощностью и возмущающей реактивностью) у реакторов ИБР-2 и ИБР-2М существенно не отличаются, и они достаточно большие.

Автор выражает искреннюю благодарность своим научным руководителям к.ф.-м.н. Ю.Н. Пепелышеву и к.т.н. А.К. Попову за интересные и важные задачи, за помощь и поддержку в работе. А также руководителям темы по развитию реактора ИБР-2 главному инженеру А.В. Виноградову, д.ф.-м.н. А.В. Белушкину за постоянное внимание и поддержку. Автор признателен к.ф.-м.н. А.Д. Рогову, к.ф.-м.н. Л.А. Тайбову, моему другу Ц. Цогтсайхану и всему коллективу группы ядерной безопасности №1 и ЛНФ ОИЯИ за творческую научную обстановку и дружескую атмосферу.

Я бесконечно благодарен моему руководителю академику Б.Чадраа и академикам Д. Сангаа, Ц. Баатару, Р. Тогоо и коллегам Института физики и технологии АНМ.

Считаю своим приятным долгом поблагодарить полномочных представителей правительства Монголии в ОИЯИ академика С. Энхбату, профессора С. Даваа, и весь коллектив национальной группы Монголии в ОИЯИ.

Автор глубоко благодарен своим родителям, родным, близким и друзьям за неоценимую поддержку и мотивацию на протяжении всего периода работы над диссертацией. Благодарю любимую жену и мать моих детей за искренность, верность, любовь, добрые слова и за то, что всегда рядом!

Работы автора по теме диссертации

- [1] Пепелышев Ю.Н., Попов А.К., Сумхуу Д., Сангаа Д. Модель динамики импульсного реактора ИБР-2М для анализа быстрых переходных процессов // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 3(194). С. 682–686.
- [2] Марачев А.А., Пепелышев Ю.Н., Попов А.К., Сумхуу Д. Реактиметр импульсного реактора периодического действия ИБР-2М // Атомная энергия. 2014. Т. 117, № 5. С. 249–254.
- [3] Pepelyshev Yu.N., Popov A.K., Sumkhuu D. Model of the IBR-2M Pulsed Reactor Dynamics for Investigating Transition Processes in a Wide Range of Power Variation // Annals of Nuclear Energy. 2015. V. 85.
 P. 488–493.
- [4] Пепелышев Ю.Н., Попов А.К., Сумхуу Д. Оценка параметров мощностной обратной связи реактора ИБР-2М с помощью прямоугольных колебаний реактивности // Атомная энергия. 2017. Т. 122, № 2. С. 63–67.
- [5] Марачев А.А., Пепелышев Ю.Н., Попов А.К., Сумхуу Д. Анализ динамики импульсного реактора ИБР-2М при статистически оптимальном автоматическом реагуляторе// Атомная энергия. 2017. Т. 123, № 3. С.172-176.
- [6] Pepelyshev Y.N., Popov A. K., Sumkhuu D. Stability analysis of the IBR-2M pulsed reactor in an automatic regulating regime at the different level of average power// European Physical Journals. 2018. №173, 04012.
- [7] Pepelyshev Yu.N., Popov A.K., Sangaa D., Sumkhuu D. Test of the model dynamics of the pulsed reactor IBR-2M // Proceeding of Institute of Physics and Technology, Mongolian Academy of Sciences. 2013. № 40, P. 85–91.
- [8] Pepelyshev Yu.N., Popov A.K., Sumkhuu D. Mathematical modeling of reactivity of the IBR-2M pulsed reactor // Proceedings of International Conference for Young Scientists Modern Problems of Applied Mathematics and Computer Science. 2014. P. 138–142.
- [9] Pepelyshev Yu.N., Popov A.K., Sumkhuu D. Some results of dynamics modeling of the IBR-2M pulsed reactor of periodic operation // Summary of an International Conference «Research Reactors: Safe Management

and Effective Utilization» Held in Vienna, 16–20 November 2015, STI/PUB/1793; (ISBN:978-92-0-105117-2), 2017.

- [10] Пепелышев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д. Сравнение мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2 и его модернизированной версии ИБР-2М. Препринт ОИЯИ Р13-2016-67. Дубна, 2016.
- [11] Pepelyshev Yu.N., Popov A.K., Sumkhuu D. Study of dynamics of the IBR-2M reactor by mathematical modeling // Mongolian Journal of Physics. December, 2016. Iss. 2. P. 522–529.
- [12] Pepelyshev Yu.N., Popov A.K., Sumkhuu D. A stability analysis of the IBR-2M pulsed reactor of periodic operation at self-regulating regime // Proceedings of International Conference on Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering, 2017; https://www.kns.org

Список литературы

- 1. Research Reactor Database [В Интернете] // International Atomic Energy Agency.
- 2. *Булкин Ю.М. и др.* Импульсный ядерный реактор Авт. свид. СССР №270911; приоритет от 13.11.1968 [Отчет].
- Ананьев В.Д., Виноградов А.В. и Долгих А.В. Реактор ИБР-2 эксплуатация и перспективы развития // 11-е ежегодное россиское совещание по безопасности исследовательских ядерных установок. - Димитровград, -2009. - С. 69-77.
- 4. Драгунов Ю.Г., Третьяков И.Т., Лопаткин А.В. и др. Модернизация импульсного исследовательского реактора ИБР-2// Атомная Энергия.
 2012 г. Т. 113. №1. С. 29-34.
- 5. Бондаренко И.И. и Стависский Ю.Я. Импульсный режим работы быстрого реактора // Атомная энергия. 1959 г. Т. 7. № 5. С. 417–420.
- Pikelner L.B. and Rudenko V.T. IBR Pulsed reactor with Injector // Proc. of "Research Applications of Nuclear Pulsed Systems". - Vienna, -1967. - P. 165.
- 7. *Бунин Б.Н. и др.* Пуск реактора ИБР-30 в режиме импульсного бустера // Сообщение ОИЯИ 13-6213. Дубна, -1972 г.
- Блохин Г.Е., Блохинцев Д.И., Блюмкина Ю.А. и др. Импульсный реактор на быстрых нейтронах // Атомная энергия. 1961 г. Т. 10. № 5. С. 437.
- 9. *Ананьев В.Д. и др.* Импульсный реактор с инжектром ИБР-2 // Сообщение ОИЯИ 13-4392. Дубна, 1969 г.
- 10. Шабалин Е.П. Импульсные реаторы на быстрых нейтронах. Москва : Атомиздат, 1976.
- 11. Raiveski V. The SORA reactor // EUR-1643. 1964.
- Wakabayashi H. and et al. Operational Experiences of YAYOI // Proceending of US/Japan Seminar on Fast Pulse Reactors. - Tokai. Jan. 19-23, 1976.
- Попов А.К. Основны управления ядерным реактором. Москва : МГУ, 2012.

- 14. *Кипин Дж.Р.* Физические основы кинетики ядерных реакторов. Пер. с англ. Москва : Атомиздат, 1967.
- 15. *Щульц М.А.* Регулирование энергитических ядерных реакторов. Москва : Изд-во иностр. лит., 1957
- 16. Хетрик Д. Динамика ядерных реакторов. Москва : Атомиздат, 1975.
- 17. Вейнберг А. и Вингер Е. Физическая теория ядерних реакторов. -Москва : Инностранной литературы, 1961.
- 18. Белл Д. и Глесстон С. Теория ядерных реакторов. Москва : Атомиздат, 1974.
- Попов А.К., Рогов А.Д. и Руденко В.Т. Оценочные частотные характеристики и передаточная функция импульсного реактора ИБР-30 // Сообщение ОИЯИ 13-80-95. - Дубна. 1980 г.
- 20. Денисов В.Д., Попов А.К. и Руденко В.Т. Частотная характеристика мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-30 // Сообщение ОИЯИ Р13-81-656. Дубна. 1981 г.
- Пепелышев Ю. Н., Попов А.К. и Рогов А.Д. Частотные характеристики быстрой мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2 // Сообщение ОИЯИ Р13-83-471. - Дубна. 1983 г.
- 22. Шабалин Е.П. и др. Импульсная характеристика обратной связи в ИБР-2 // Атомная Энергия. 1991 г. Т. 70. № 5. С. 326-329.
- 23. Попов А.К. Частотная и импульсная переходные характеристики мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2 // Препринт ОИЯИ. Дубна. 1990 г.
- 24. Попов А.К. Оценка импульсной переходной характеристики мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2 частотным методом // Сообщение ОИЯИ Р13-92-551. Дубна. 1992 г.
- 25. *Камионский В.Л.* Нелинейность мощностной обратной связи в реакторе ИБР-2 // Сообщение ОИЯИ Р13-93-95. Дубна. 1993 г.
- 26. Попов А.К. Упрощенная нелинейная модель мощностной обратной связи реактора ИБР-2 // Сообщения ОИЯИ Р13-95-464. - Дубна. 1995 г.
- 27. Попов А.К. Анализ устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при двятипараметрическогой модели мощностной обратной связи // Сообщение ОИЯИ Р13-96-297. Дубна. 1996 г.

- Попов А.К. и Рогов А.Д. Программа для моделирования на ЭВМ динамики импульсного реактора // Деп. ОИЯИ Б1-11-10120. - Дубна. 1976 г.
- Попов А.К. Анализ длительного колебательного переходного процесса мощности импульсного реактора ИБР-2 // Сообщение ОИЯИ Р13-97-361. -Дубна. 1997 г.
- Бондарченко Е.А., Пепелышев Ю.Н. и Попов А.К. Модель импульсного реактора периодического действия ИБР-2 для исследования переходных процессов // Препринт ОИЯИ Р13-99-127. - Дубна. 1999 г.
- Бондарченко Е.А., Пепелышев Ю.Н. и Попов А.К. Влияние параметров автоматического ргулятора на переходные процессы мощности реактора ИБР-2 // Препринт ОИЯИ Р13-99-200. - Дубна. 1999 г.
- 32. Popov A.K., Pepelyshev Yu.N. and Bondarchenko E.A. The model of IBR-2 pulsed reactor of periodic operation for investigations of transitional processes // Annals of Nuclear Energy. - 2000. - T. 27. - P. 563–574.
- 33. Bondarchenko E.A., Pepyolyshev Yu.N. and Popov A.K. Influence of Automatic Regulator Parameters on Power Transitional Processes of the IBR-2 reactor // Annals of Nuclear Energy. - 2001. - T. 28. - P. 63-78.
- 34. Popov A.K., Pepelyshev Yu.N. and Bondarchenko E.A. The model of the IBR-2 pulsed reactor dynamics and investigation of pulse energy stabilization // Nuclear Technology. 2002. T. 139. № 1. P. 21–29.
- 35. Бондарченко Е.А., Пепелышев Ю.Н. и Попов А.К. Экспериментальное и модельное исследование особенностей динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2 // Физика элементарных частиц и атомного ядра. - 2004 г. - Т. 35. № 4. - С. 928–983.
- 36. Попов А.К. Анализ устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при включенном автоматическом регуляторе // Сообщение ОИЯИ Р13-98-275. - Дубна. 1998 г.
- 37. *Сандмайер А.Г.* Кинетика и стабильность реакторов на быстрых нейтронах. - Москва : Госатомиздат, 1963.
- 38. Пепелышев Ю.Н., Тайбов Л.А., Гарибов А.А. и др. Экспериментальная оценка параметров кинетики реактора ИБР-2М по стохастическим шумам мощности // Атомная Энергия. - 2012 г. - Т. 113. № 4. - С. 202-205.
- Попов А.К. Импульсный коэффициент передачи реактора ИБР-2 // Сообщение ОИЯИ РЗ-95-463. - Дубна. 1995 г.

- 40. Попов А.К. О статистически оптимальном регулировании энергии импульсов быстрого реактора // Атомная энергия. - 1971 г. - Т. 31. № 3. -С. 269.
- 41. Popov A.K. and Marachev A.A. On Statistically Optimal Algorithms of Regulation of a Pulsed Reactor // Nuclear Waste Research: Siting, Technology and Treatment / editor Lattefer Arnold P. - New York : Nova Science Publishers, Inc, 2008 г. - Р. 107–141.
- 42. Marachev A.A., Pepyolyshev Yu.N. and Popov A.K. Statistically optimal filter for IBR-2 mean power estimation // Annals of Nuclear Energy. 2008.
 T. 35. P. 1779–1784.
- 43. Пепелышев Ю.Н. и Попов А.К. Оценка параметров мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2М по переходным процессам // Препринт ОИЯИ Р13-2013-9. - Дубна. 2013 г.
- 44. Kalman R.E. and Bucy R.S. New results in Linear Filtering and Predication Theory // Trans ASME (J. Basic Engineering). March 1961. 1 : T. 83D. P. 189-213.
- 45. Попов А.К. и Марачев А.А. О статистически оптимальных алгоритмах регулирования для различных режимов работы импульсного реактора // Сообщение ОИЯИ Р13-2002-277. Дубна. 2002 г.
- 46. Попов А.К. Элементы теории автоматического управления. Москва : МИРЭА, 2008. - Т. 1 : 2.
- 47. *Попов А.К.* Элементы теории автоматического управления. Москва : МИРЭА, 2008. Т. 2 : 2.
- 48. Chestnut H. and Mayer R.W. Servomechanisms and regulating system design. New York : Wiley, 1951.
- 49. Evans J.W. Control system dynamics. New York : McGraw-Hill, 1954.
- 50. *Hetrick D.L. and Weaver L.E.* Some recent advances in reactor dynamics and control // Proceeding of the Brookhaven conference in industrial needs and academic research in reactor kinetics. 1968.
- 51. *Thaler G.J.* Elements of servomechanism theory. New York : McGraw-Hill, 1955.
- 52. *Траксел Дж.* Синтез систем автоматического регулирования. Москва : Машгиз, 1959.
- 53. *Харрер Дж.М.* Техника регулирования ядерных реакторов. Москва : Атомиздат, 1967.

- 54. Weaver L.E. System analysis of nuclear reactor dynamics. New York : Rowman and Littlefield, 1963.
- 55. *Пепелышев Ю.Н. и Попов А.К.* Оценка параметров мощностной обратной связи и устойчивости ИБР-2 при различных уровнях средней мощности // Атомная Энергия. 2007 г. Т. 103. № 2. С. 89-93.
- 56. Ли Ен Чхан и Пепелышев Ю.Н. Изменение быстрых эффектов реактивности в процессе работы реактора ИБР-2 // Сообщение ОИЯИ Р13-2008-1. - Дубна. 2008 г.

Список рисунков

1.1	Поперечный разрез активной зоны реактора ИБР-2М	11
1.2	Активная зона реактора ИБР-2М	13
1.3	Импульс мощности и верхняя часть импульса реактивности на	
	мгновенных нейтронах	13
1.4	Изменение реактивности на мгновенных нейтронах и мощности	
	между соседними импульсами мощности	14
1.5	Схема натриевого охлаждения реактора ИБР-2М	15
2.1	Ход реактивности при встречном перемещении роторов ПО-3 в	
	интервале $\pm 12^{\circ}$	26
2.2	Зависимость импульсного коэффициента передачи по энергии	
	импульса и по амплитуде импульса от реактивности ИБР-2М	27
2.3	Блок-схема реактора ИБР-2М	36
2.4	Блок-схема кинетики импульсного реактора ИБР-2М	37
2.5	Блок-схема мощностной обратной связи	37
2.6	Блок-схема АР импульсного реактора ИБР-2М	38
2.7	Градуировочная кривая эффективности блоков СУЗ	38
2.8	Преднамеренное изменение реактивности промежуточным	
	регулятором и вызванное этим относительное отклонение энергии	
	импульсов мощности	39
2.9	Перемещение блоков СУЗ по сигналу на сброс и изменение	
	реактивности в результате	40
2.10	Переходные процессы амплитуда импульсов мощности, вызванные	
	сбросом АЗ и аварийным перемещением КО и ПР	41
2.11	Относительное отклонение энергии импульсов мощности при скачке	
	реактивности для первого варианта АР	42
2.12	Относительное отклонение энергии импульсов мощности при скачке	
	реактивности для второй варианта АР	43
2.13	Среднеквадратическое отклонение энергии импульсов мощности	
	как функция параметров для первого и второй варианта АР	44
2.14	Зависимость импульсного коэффициента передачи по энергии	
	импульса и по амплитуде импульса от реактивности ИБР-2М	45

2.15	Блок-схема реактиметра импульсного реактора ИБР-2М	46
2.16	Логарифмические амплитудные и фазочастотные характеристики	
	фильтра	47
2.17	Вариант расположения статистически оптимального фильтра для	
	получения сглаженной реактивности	48
2.18	Зарегистрированные переходные процессы	49
2.19	Реактивность $\Delta \varepsilon_m(1)$, соответствующая рис. 2.17, и сглаженная	
	реактивность $\Delta ilde{arepsilon}_m$ для первого варианта расположения фильтра	
	(см. рис. 2.16а) при коэффициенте сглаживания: $q = 4$ (2); 8(3);	
	$16(4); 32(5) \ldots \ldots$	49
3.1	Реактивность AP r_0 в виде прямоугольных колебаний амплитудой	
	$0,1\beta_{\text{и}}$ с периодом 32 с (a) , суммарная реактивность r AP и шума	
	(δ) и относительное отклонение энергии импульсов мощности $\Delta e_{\mathbf{u}}$ (e)	54
3.2	Блок мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2М	56
3.3	Импульсная переходная характеристика МОС	57
3.4	Структурная схема МОС в линейном приближении	59
3.5	Блок-схема нелинейной МОС реактора ИБР-2М	60
3.6	Переходные процессы при изменении реактивности	62
3.7	Переходные процессы, вызванные прямоугольных колебаниях	
	задающей реактивности при разных средней мощности реактора	64
3.8	Структурная схема импульсного реактора ненулевой мощности в	
	линейном приближении	67
3.9	Амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой	
	системы при представлении реактора без автоматического	
	регулятора в виде одноконтурной замкнутой системы	68
3.10	Зависимости запас устойчивости по амплитуде и по фазе от	
	средней мощности импульсного реактора ИБР-2М	69
3.11	Блок-схема импульсного реактора с автоматическим регулятором	
	для режима стабилизации	70
3.12	Структурная схема линейной модели импульсного реактора с	
	автоматическим регулятором	70

3.13	Амплитудно-фазовые частотные характеристики разомкнутой	
	системы "регулятор – реактор" для двух значений параметра	
	скорости АР Δ =0,05 (a) и Δ =0,2 (b) при разных значениях	
	коэффициента сглаживания фильтра q	71
3.14	Амплитудно-фазовые частотные характеристики разомкнутой	
	системы" регулятор – реактор" для второго варианта АР при	
	N = 8 (a) и $N = 16$ (б)	72
3.15	Запасы по амплитуде и фазе разомкнутой системы регулятор-реактор	72
3.16	Энерговыработки импульсных реакторов ИБР-2 (0) и ИБР-2М (•) в	
	зависимости времени работы реактора (a) и коэффициент	
	мощностной обратной связи ИБР-2 $\left(k_T ight)$ в зависимости от	
	энерговыработки (б). Энерговыработка равна $\sim 850~{ m MBt}\cdot{ m cyt}$	74
3.17	Переходные процессы изменения энергии импульсов реакторов	
	ИБР-2 (a) и ИБР-2М (б) при прямоугольных колебаниях задающей	
	реактивности при средней мощности 2,0 МВт	75
3.18	Импульсные переходные характеристики МОС ИБР-2 (1) и	
	ИБР-2М (2) при номинальной средней мощности реакторов 2 МВт	
	и энерговыработке 850–900 MBт·сут	76
3.19	Амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой	
	системы при представлении реакторов ИБР-2 (1) и ИБР-2М (2) без	
	автоматического регулятора в виде одноконтурной замкнутой	
	системы при средней мощности 2 МВт	77

Список таблиц

1	Основные параметры и характеристики ИБР-2М	10
2	Среднеквадратическое отклонение при разных значениях коэффициента сглаживания для двух вариантов расположения фильтра	48
3	Параметры МОС ИБР-2М в представлении трех линейных апериодических звеньев при разных уровнях мощности	63
4	Параметры ИБР-2 и ИБР-2М на момент сравнения динамики реакторов при номинальной мощности 2 МВт	74
5	Параметры МОС ИБР-2М при штатном расходе натриевого теплоносителя через активную зону 100 м ³ /ч (2015 г.) и параметры МОС ИБР-2 при штатном расходе теплоносителя 90 м ³ /ч (1988 г.) при номинальной средней мощности 2 МВт и энерговыработке ~	
	850 МВт·сут	76