

P13-2019-42

Ю. Н. Пепельшев, А. К. Попов, Д. Сумхуу

**МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА
ИБР-2М С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ
И МОЩНОСТНЫХ ЭФФЕКТОВ
БЫСТРОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ**

Направлено в журнал «Вопросы атомной науки и техники.
Серия: Физика ядерных реакторов»

Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д.

P13-2019-42

Модель динамики импульсного реактора ИБР-2М с учетом температурных и мощностных эффектов быстрой обратной связи

Созданная ранее модель динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2М включает в себя обратную связь, которая из-за сложности описания процессов в активной зоне была представлена сугубо математическим, а не физическим образом. В работе рассмотрена модель динамики с выделенной температурной обратной связью, формируемой средними температурами топлива и теплоносителя. Показано, что при этом реактивность обратной связи не может быть описана только этими составляющими. В связи с этим в модель была введена также мощностная обратная связь (зависимость реактивности обратной связи от мощности). В модели использованы дискретные передаточные функции, отражающие динамику импульсных процессов в реакторе. Экспериментальным путем определены параметры обратной связи. Модель может быть использована для описания изменений энергии импульсов в широком динамическом диапазоне.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2019

Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.

P13-2019-42

Model Dynamics of the IBR-2M Pulsed Reactor with Temperature and Power Fast Feedback Effects

The earlier established model of dynamics of the IBR-2M pulsed reactor of periodic operation includes feedback, which, due to the complexity of the description of processes in the core, was presented in a purely mathematical, but not physical way. The paper considers a dynamics model with a dedicated temperature feedback formed by the average temperatures of the fuel and coolant. It is shown that in this case the feedback reactivity cannot be described only by these components. Therefore, power feedback (the dependence of feedback reactivity on power) was also introduced in the model. The model uses discrete transfer functions that reflect the dynamics of pulsed processes in the reactor. Feedback parameters were estimated experimentally. The model can be used to describe changes in the energy of pulses in a wide dynamic range.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2019

ВВЕДЕНИЕ

Для оценки поведения импульсного реактора периодического действия ИБР-2М в быстрых переходных процессах (минуты) была создана модель динамики реактора [1–3]. Эта модель позволяет анализировать различные ситуации, возникающие при нормальной работе реактора, а также аварийные ситуации, включая аварийные сбросы мощности на пять порядков ниже номинального уровня. Однако из-за сложности описания процессов, происходящих в активной зоне и влияющих на поведение обратной связи, это сугубо математическая модель, отражающая результат влияния обратной связи, но не ее физическую сущность. На динамику реактора существенное влияние оказывает разогрев реактора, в частности температуры топлива и теплоносителя. Поскольку в ИБР-2М температура топлива не регистрируется, влияние разогрева учитывалось введением в модель не температурной обратной связи (температура–реактивность), а мощностной (мощность–реактивность). Для лучшего восприятия физических процессов, происходящих в активной зоне, в модели динамики отдельно выделена температурная обратная связь, представленная в виде двух каналов, обусловленных средними температурами топлива и теплоносителя, а также мощностная.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РЕАКТОРА ИБР-2М

Активная зона реактора имеет форму неправильной шестигранной призмы, расположенной вертикально (рис. 1). Мимо одной из граней проходят два соосно вращающихся подвижных отражателя — основной (ОПО) и дополнительный (ДПО), представляющих собой модулятор реактивности. К пяти остальным граням примыкают стационарные отражатели с блоками аварийной защиты и регулирования реактора. При вращении подвижные отражатели создают в ИБР-2М периодические импульсы реактивности. Эти импульсы возникают при одновременном прохождении мимо активной зоны ОПО и ДПО. Органы управления вводятся в такое положение, что на короткое время реактивность реактора, обусловленная импульсами реактивности, становится положительной на мгновенных нейтронах. Таким образом, реактор на короткое

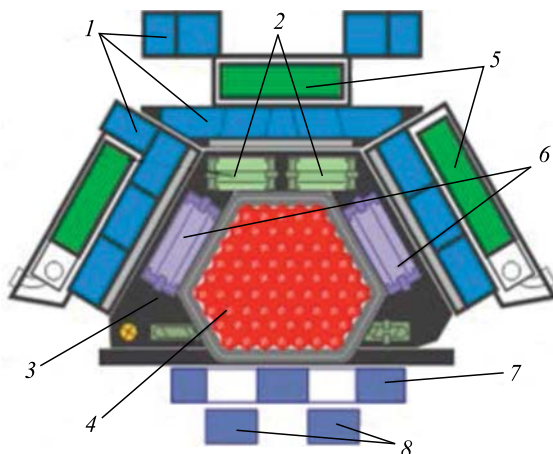


Рис. 1. Поперечный разрез активной зоны реактора ИБР-2М: 1 — водяные замедлители; 2 — блоки аварийной защиты (А31 и А32); 3 — стационарный отражатель; 4 — тепловыделяющие сборки; 5 — холодные замедлители; 6 — блоки компенсирующих органов (КО1 и КО2); 7 — основной подвижный отражатель; 8 — дополнительный подвижный отражатель

время становится надкритическим на мгновенных нейтронах. В результате реактор генерирует короткие нейтронные импульсы (200 мкс на половине высоты) с периодом 0,2 с и амплитудой почти на четыре порядка больше

Таблица 1. Параметры ИБР-2

Параметр	Значение
Средняя мощность, МВт	2
Тип топлива	PuO ₂
ТВС	69
Теплоноситель	Na
Максимальное выгорание, %	9
Частота импульсов, Гц	5, 10
Полуширина импульса, мкс:	
быстрые нейтроны	200
тепловые нейтроны	340
Скорость вращения, об/мин:	
основной отражатель	600
дополнительный отражатель	300
Плотность потока тепловых нейтронов с поверхности замедлителя, см ⁻² ·с ⁻¹ :	
усредненная по времени	~ 10 ¹³
максимум в импульсе	~ 10 ¹⁶

мощности между импульсами. Практически вся энергия, выделяемая за период, генерируется в импульсе (92 %). Следует отметить, что для стационарных реакторов выход в надкритическое состояние на мгновенных нейтронах по соображениям безопасности совершенно недопустим.

Активная зона, рассчитанная на загрузку 69 кассет (каждая из семи твэлов с двуокисью плутония), охлаждается теплоносителем (жидким натрием) (табл. 1).

В качестве органов систем управления и защиты используются подвижные части стационарного отражателя из вольфрама (блоки аварийной защиты, блоки компенсирующих органов и блок промежуточного регулятора) и стержень автоматического регулятора из бериллия в матрице стационарного стального отражателя.

Регулирование уровня нейтронной мощности ИБР-2М осуществляется с помощью автоматического регулятора. При аварийном сигнале на сброс мощности каждый из блоков аварийной защиты с большой скоростью перемещается вниз и за время между импульсами переводит реактор из состояния равновесной импульсной надкритичности в глубоко подкритическое состояние. Развитие следующего импульса практически прекращается.

2. ОТЛИЧИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ОТ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ

Увеличение мощности реактора приводит к увеличению температуры составляющих его частей, расширению топлива, теплоносителя и т.д. При уменьшении мощности происходят обратные изменения. Все это вызывает

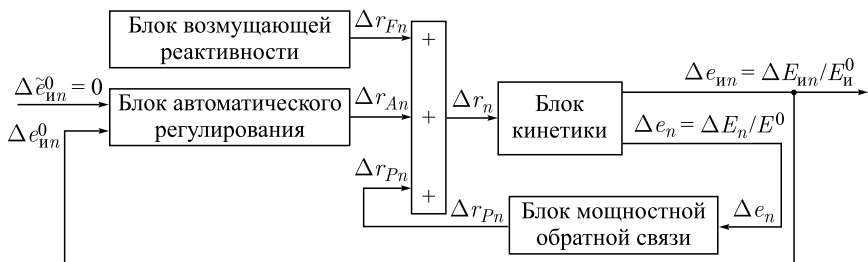


Рис. 2. Общая блок-схема реактора ИБР-2М в режиме автоматического регулирования: Δr — реактивность реактора (т.е. суммарная $\Delta r = \Delta r_F + \Delta r_A + \Delta r_P$); Δr_F — реактивность, обусловленная внешними факторами; Δr_A — вносимая автоматическим регулятором; Δr_P — обусловленная мощностной обратной связью; Δe_n и Δe — относительное отклонение энергии импульсов мощности и энергии за период импульсов (полной энергии); n — номер импульса мощности



Рис. 3. Основная структурная схема математической модели импульсного реактора ИБР-2М в режиме саморегулирования с учетом только мощностной обратной связи (МОС): Δr_3 — задающая реактивность

изменение реактивности и, следовательно, мощности. Эта обратная связь оказывает сильное влияние на переходные процессы мощности и устойчивость реактора [4]. Ранее в модели динамики ИБР-2М влияние разогрева реактора на реактивность учитывалось с помощью только мощностной обратной связи. Для удобства расчета модель динамики была построена на основе модульной структуры и состояла из блока кинетики и блока мощностной обратной связи (рис. 2). Блок кинетики соответствует решению системы уравнений импульсного реактора, полученных из общепринятых уравнений одноточечной модели реактора. Входящие в уравнения значения времени жизни мгновенных нейтронов и эффективной доли запаздывающих нейтронов были получены при физическом пуске реактора ИБР-2М.

Структура и параметры мощностной обратной связи в приведенной на рис. 3 модели были оценены путем математической обработки зарегистрированных переходных процессов изменения энергии импульсов мощности (Δe_n), вызванных прямоугольными колебаниями реактивности (Δr_3) [3]. Реактивность Δr_3 изменялась автоматическим регулятором. Блок автоматического регулятора был выведен из системы управления, и реактор работал в режиме саморегулирования. Мощностная обратная связь в модели была представлена в виде трех параллельных каналов, каждый из которых был описан дифференциальным уравнением первого порядка.

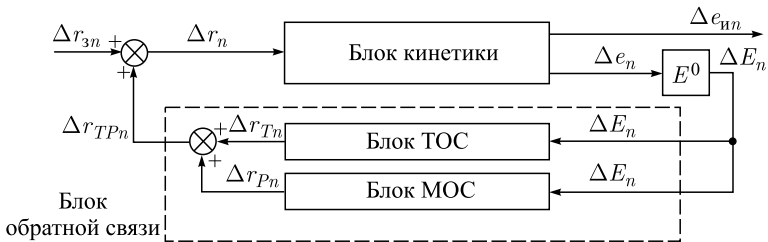


Рис. 4. Блок-схема модели динамики реактора ИБР-2М с учетом температурной (ТОС) и мощностной (МОС) обратной связи: Δr_T — отклонение реактивности ТОС; Δr_P — отклонение реактивности МОС; Δr_{TP} — отклонение реактивности обратной связи

Поскольку, как уже было сказано выше, математическая модель интерпретации мощностной обратной связи не отражает физическую картину влияния разогрева реактора на реактивность, к предыдущей модели был добавлен блок температурной обратной связи. Этот блок учитывает влияние на реактивность средней температуры топлива и теплоносителя. Воздействие других факторов разогрева реактора на реактивность учтено введением в модели двух параллельных каналов мощностной обратной связи. Блок-схема модели динамики ИБР-2М с учетом температурной и мощностной обратной связи представлена на рис. 4.

3. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ И МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Модель обратной связи, как показано на рис. 4, представлена двумя блоками: температурным (зависимость реактивности от средних температур топлива и теплоносителя) и мощностным (зависимость реактивности от мощности реактора). Ниже рассмотрены параметры температурной и мощностной обратной связи.

3.1. Средние температуры топлива и теплоносителя. Температурная обратная связь описана уравнениями, полученными в предположении, что процессы в активной зоне тождественны процессам в одном эквивалентном

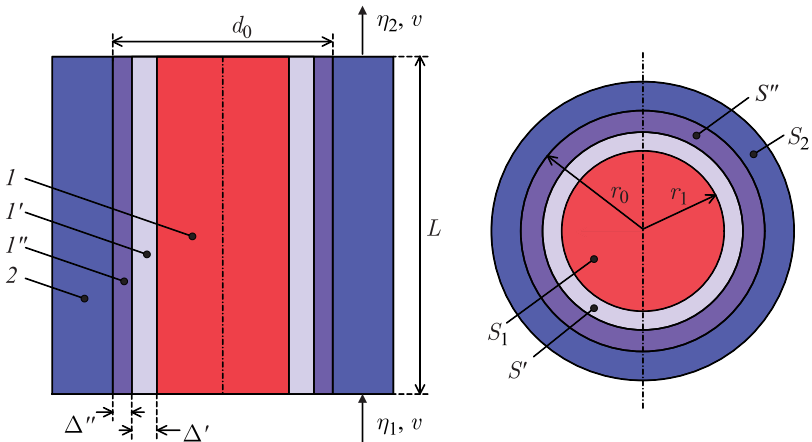


Рис. 5. Эквивалентный твэл: 1 — твэл; 1' — контактный слой; 1'' — оболочка; 2 — канал теплоносителя; Δ' , Δ'' — толщины контактного слоя и оболочки; η_1, η_2 — температуры теплоносителя на входе и выходе канала; v — скорость теплоносителя; L — длина эквивалентного твэла; d_0 — наружный диаметр оболочки; r_1, r_0 — радиус твэла и наружный радиус оболочки; S_1, S', S'', S_2 — поперечное сечение соответственно топлива, контактного слоя, оболочки и теплоносителя

твэле (рис. 5). Эквивалентный твэл представляет собой топливный сердечник, выполненный в виде набора таблеток из двуокиси плутония и оболочки из нержавеющей стали. Между топливом и оболочкой находится гелиевый контактный слой. Размеры и характеристики компонентов твэла полностью соответствуют твэлам ИБР-2М [5].

Это предположение вытекает из следующих упрощающих допущений:

1. Активная зона реактора состоит из идентичных твэлов с одинаковым тепловыделением.
2. Плотность нейтронов одинаково распределена по всему объему твэла.
3. Переток тепла в осевом направлении отсутствует.
4. Поток теплоносителя равномерно распределен по технологическим каналам активной зоны, которые также считаются идентичными.

Из условия теплового баланса следует, что связь между температурами топлива, теплоносителя и мощностью реактора выражается двумя дифференциальными уравнениями в частных производных. Для удобства моделирования с помощью аппроксимирующего полинома Эрмита сделан эквивалентный переход от двух уравнений в частных производных к трем обыкновенным дифференциальным уравнениям и одному алгебраическому [5]:

$$T_{\theta} \frac{d\bar{\theta}}{dt} + \bar{\theta} = k_P P + \bar{\eta}, \quad (1)$$

$$T_{\eta} \frac{d\bar{\eta}}{dt} + \bar{\eta} = \bar{\theta} + k_{\eta} v \psi, \quad (2)$$

$$T_{\psi} \frac{d}{dt} \left(\frac{d\psi}{dt} + \psi \right) = k_{\psi} \left(T_{\theta} \frac{d\gamma}{dt} + \gamma \right), \quad (3)$$

$$\gamma = 12a_4 v \left[\eta_1 - \bar{\eta} - \frac{1}{2} \psi \right], \quad (4)$$

где P — мощность; $\bar{\theta}, \bar{\eta}$ — усредненные по высоте температуры топлива (твэла) и теплоносителя соответственно; $\psi = \eta_1 - \eta_2$, η_1, η_2 — температуры теплоносителя на входе и выходе канала; γ — обобщенный температурный параметр теплоносителя; t — время.

В уравнениях (1)–(3) введены обозначения постоянных времени

$$T_{\theta} = \frac{1}{a_2}, \quad T_{\eta} = \frac{1}{a_3}, \quad T_{\psi} = \frac{T_{\theta} T_{\eta}}{T_{\theta} + T_{\eta}} \quad (5)$$

и коэффициентов передачи

$$k_P = \frac{a_1}{a_2}, \quad k_{\eta} = \frac{a_4}{a_3}, \quad k_{\psi} = \frac{T_{\eta}}{T_{\theta} + T_{\eta}}. \quad (6)$$

Параметры a_1, a_2, a_3, a_4 определяются формулами

$$a_1 = \frac{1}{NL(c_1\gamma_1 S_1 + c'\gamma'S' + c''\gamma''S'')}, \quad (7)$$

$$a_2 = ka_2^0, \quad (8)$$

$$a_2^0 = \frac{\pi d_0}{c_1\gamma_1 S_1 + c'\gamma'S' + c''\gamma''S''}, \quad (9)$$

$$a_3 = ka_3^0, \quad (10)$$

$$a_3^0 = \frac{\pi d_0}{c_2\gamma_2 S_2}, \quad (11)$$

$$a_4 = 1/L, \quad (12)$$

где c_1, c', c'', c_2 — теплоемкости; $\gamma_1, \gamma', \gamma'', \gamma_2$ — плотности соответственно топлива, контактного слоя, оболочки и теплоносителя; N — количество твэлов; k — коэффициент теплопередачи от топлива к теплоносителю, равный

$$k = \frac{1}{\frac{r_0}{4\lambda_1} + \frac{r_0}{r_1} \left(\frac{\Delta'}{\lambda'} + \frac{\Delta''}{\lambda''} \right) + \frac{1}{\alpha}}. \quad (13)$$

Здесь $\lambda_1, \lambda', \lambda''$ — коэффициенты теплопроводности соответственно топлива, контактного слоя и оболочки; α — коэффициент теплоотдачи от оболочки к теплоносителю. Формула (13) получена согласно традиционной методике [6].

Параметры, влияющие на коэффициент теплопередачи от топлива к теплоносителю (13) и, следовательно, на постоянные времени (5) и коэффициенты передачи (6), зависят от средней температуры топлива и теплоносителя [5].

В штатном режиме работы реактора, т.е. в режиме поддержания номинального (базового) значения мощности, отклонение температур от их базовых значений невелико. Это дает основание считать постоянные времени и коэффициенты передачи неизменными величинами.

Номинальной средней мощности ИБР-2М, равной 2 МВт, соответствует средняя температура топлива 1150 К [7]. Этой температуре соответствуют следующие значения параметров: $a_1 = 24,1 \text{ К}/(\text{МВт} \cdot \text{с})$, $a_2^0 = 1,40 \times 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/(\text{Вт} \cdot \text{с})$, $a_3^0 = 9,01 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/(\text{Вт} \cdot \text{с})$, $a_4 = 2,25 \text{ м}^{-1}$, $\alpha = 131,4 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $k = 0,924 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\eta_1 = 573 \text{ К}$ и $v = 3 \text{ м/с}$.

Из соотношений (5), (6) и (8), (9) следует, что постоянные времени температур топлива T_θ и теплоносителя T_η , а также коэффициенты передачи k_P и k_η обратно пропорциональны коэффициенту теплопередачи k , который является функцией от коэффициента теплопроводности топлива λ_1 (13). В свою очередь, λ_1 заметно зависит от температуры топлива [6], иначе говоря,

от мощности активной зоны ИБР-2М, где в качестве топлива используется двуокись плутония.

Для удобства моделирования от уравнений (1)–(4) для полных переменных P , θ , $\bar{\eta}$, ψ и γ удобно перейти к уравнениям (14)–(17) для отклонений переменных ΔP , $\Delta\bar{\theta}$, $\Delta\bar{\eta}$, $\Delta\psi$ и $\Delta\gamma$ от их базовых значений P^0 , $\bar{\theta}^0$, $\bar{\eta}^0$, ψ^0 и γ^0 , соответствующих установившемуся режиму: $\Delta P = P - P^0$, $\Delta\bar{\theta} = \bar{\theta} - \bar{\theta}^0$, $\Delta\bar{\eta} = \bar{\eta} - \bar{\eta}^0$, $\Delta\psi = \psi - \psi^0$ и $\Delta\gamma = \gamma - \gamma^0$.

В связи с этим вместо уравнений (1)–(4) в модели использованы соответствующие им уравнения:

$$T_\theta \frac{d\Delta\bar{\theta}}{dt} + \Delta\bar{\theta} = k_P \Delta P + \Delta\bar{\eta}, \quad (14)$$

$$T_\eta \frac{d\Delta\bar{\eta}}{dt} + \Delta\bar{\eta} = \Delta\bar{\theta} + k_\eta v \Delta\psi \quad (15)$$

$$T_\psi \frac{d^2}{dt^2} \Delta\psi + \frac{d}{dt} \Delta\psi = k_\psi \left(T_\theta \frac{d\Delta\gamma}{dt} + \Delta\gamma \right), \quad (16)$$

$$\Delta\gamma = -12a_4 v \left[\Delta\bar{\eta} + \frac{1}{2} \Delta\psi \right]. \quad (17)$$

Установившемуся режиму соответствуют нулевые значения отклонений в уравнениях (14)–(17).

Постоянные времени характеризуют инерционность выходных сигналов относительно входных. Так, если в уравнении (14) входной сигнал $\Delta\bar{\eta}$ изменится скачком от нулевого уровня до уровня $\Delta\bar{\eta}^*$, скорость нарастания выходного сигнала в начальный момент времени будет равна $d\Delta\bar{\theta}/dt = \Delta\bar{\eta}^*/T_\theta$. Аналогичным образом постоянная времени T_η характеризует инерционность выходного сигнала $\Delta\bar{\eta}$ при скачкообразном входном сигнале, а постоянная времени T_ψ — инерционность выходного сигнала $\Delta\psi$ при импульсном входном сигнале.

Номинальной мощности 2 МВт соответствуют следующие значения постоянных времени и коэффициентов передачи: $T_\theta = 7,71$ с, $T_\eta = 1,20$ с, $T_\psi = 1,03$ с, $k_P = 186,17$ К/МВт, $k_\eta = 2,70$ (м/с) $^{-1}$ и $k_\psi = 0,13$.

Уравнениям (14)–(17) соответствует блок-схема, показанная на рис. 6.

Передачные функции в блок-схеме на рис. 6 имеют вид

$$W_\theta(s) = \frac{\Delta\bar{\theta}(s)}{k_P \Delta P(s) + \Delta\bar{\eta}(s)} = \frac{1}{T_\theta s + 1}, \quad (18)$$

$$W_\eta(s) = \frac{\Delta\bar{\eta}(s)}{\Delta\bar{\theta}(s) + k_\eta v \Delta\psi(s)} = \frac{1}{T_\eta s + 1}, \quad (19)$$

$$W_\psi(s) = \frac{\Delta\psi(s)}{k_\psi \Delta\gamma(s)} = \frac{T_\theta s + 1}{T_\psi s^2 + s}. \quad (20)$$

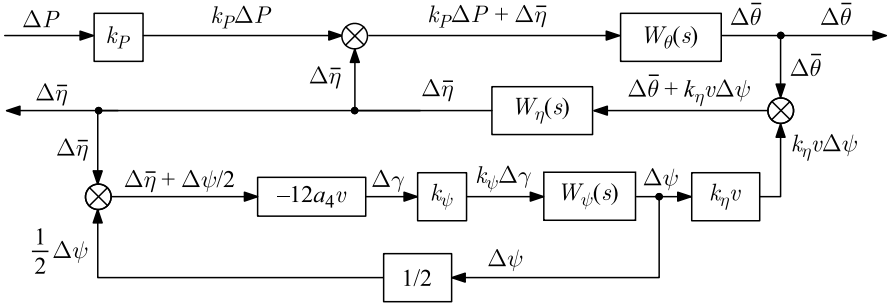


Рис. 6. Блок-схема, соответствующая уравнениям (14)–(17): $W_\theta(s)$, $W_\eta(s)$ и $W_\psi(s)$ — непрерывные передаточные функции

В реакторе ИБР-2М мощность P представляет собой последовательность импульсов. При этом ширина импульсов на половине высоты (200 мкс) почти на три порядка меньше периодов следования импульсов ($T_n = 0,2$ с). Это дает основание рассматривать импульсы мощности как идеальные, т. е. представлять мощность каждого импульса как произведение энергии импульса на дельта-функцию: $\Delta P(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \Delta E_n \delta(t - nT_n)$. Энергия каждого импульса зависит лишь от значений параметров, соответствующих моменту формирования этого импульса. В связи с этим в модели использованы дискретные передаточные функции. Каждая из них отражает связь между выходными и входными сигналами в дискретные моменты времени, а именно в моменты формирования импульсов мощности, и равна отношению z -изображений выходного сигнала к входному. Связь переменной z с переменной Лапласа s выражается соотношением $z = e^{sT_n}$.

Зависимостям средних температур топлива и теплоносителя от их входных сигналов соответствуют непрерывные передаточные функции со сложными внутренними обратными связями. Аналитический переход от таких передаточных функций к соответствующим им дискретным весьма затруднителен. В связи с этим в модели применен хорошо зарекомендовавший себя приближенный переход к дискретным передаточным функциям с использованием метода билинейного z -преобразования [8, 9]. В этом случае $s = (2/T_n)((z - 1)/(z + 1))$.

Используемые в модели дискретные передаточные функции для топлива $W_\theta(z)$ и теплоносителя $W_\eta(z)$ имеют следующий вид:

$$W_\theta(z) = \frac{\Delta\bar{\theta}(z)}{k_P \Delta E(z) + \Delta\bar{\eta}(z)} = \frac{T_n}{2T_\theta + T_n} \frac{z + 1}{z - \frac{(2T_\theta - T_n)}{(2T_\theta + T_n)}}, \quad (21)$$

$$W_{\eta}(z) = \frac{\Delta \bar{\eta}(z)}{\Delta \bar{\theta}(z) + k_{\eta} v \Delta \psi(z)} = \frac{T_{\eta}}{2T_{\eta} + T_{\eta}} \frac{z + 1}{z - \frac{(2T_{\eta} - T_{\eta})}{(2T_{\eta} + T_{\eta})}}, \quad (22)$$

$$W_{\psi}(z) = \frac{\Delta \psi(z)}{k_{\psi} \Delta \gamma(z)} = \frac{T_{\eta}(T_{\theta} - T_{\psi})}{2T_{\psi} + T_{\eta}} \frac{z + 1}{z - \frac{(2T_{\psi} - T_{\eta})}{(2T_{\psi} + T_{\eta})}} + \frac{T_{\eta}(z + 1)}{2(z - 1)}. \quad (23)$$

Уравнениям (21)–(23), выражающим зависимость отклонения средних температур топлива и теплоносителя от отклонения энергии импульсов мощности, соответствует блок-схема, показанная на рис. 7.

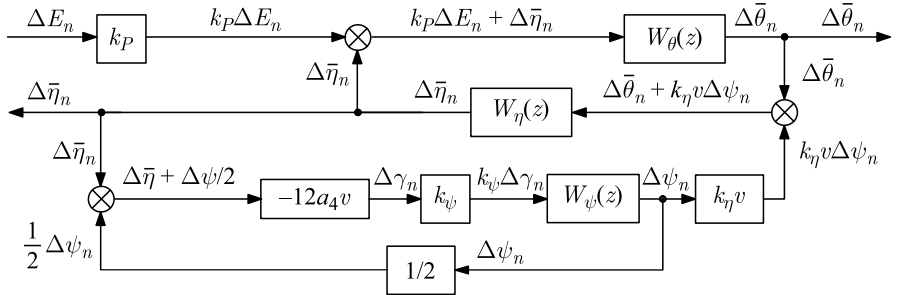


Рис. 7. Блок-схема зависимости отклонения средних температур топлива $\Delta \bar{\theta}$ и теплоносителя $\Delta \bar{\psi}$ от отклонения энергии импульсов мощности ΔE

3.2. Температурная обратная связь. В модели динамики ИБР-2М в режиме саморегулирования реактивность реактора представлена суммой

$$\Delta r = \Delta r_0 + \Delta r_{TP}, \quad (24)$$

где Δr_0 , Δr_{TP} — отклонения реактивностей задающей и обратной связи от их базовых (нулевых) значений соответственно.

В качестве единицы измерения реактивности принята импульсная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{и}}$ [10]. Для ИБР-2М $\beta_{\text{и}} = 1,54 \cdot 10^{-4}$.

Отклонение реактивности обратной связи представлено в виде суммы трех составляющих:

$$\Delta r_{TP} = \Delta r_{\theta} + \Delta r_{\eta} + \Delta r_P.$$

Здесь Δr_{θ} , Δr_{η} — отклонения реактивности, обусловленные отклонениями температур топлива и теплоносителя от их базовых значений $\bar{\theta}^0$, $\bar{\eta}^0$; Δr_P — отклонение реактивности, обусловленное каналами мощностной обратной связи.

Принято, что Δr_{θ} , Δr_{η} пропорциональны отклонениям температур топлива и теплоносителя соответственно:

$$\Delta r_{\theta} = \alpha_{\theta} \Delta \bar{\theta} = \alpha_{\theta} (\bar{\theta} - \bar{\theta}^0), \quad (25)$$

$$\Delta r_{\eta} = \alpha_{\eta} \Delta \bar{\eta} = \alpha_{\eta} (\bar{\eta} - \bar{\eta}^0). \quad (26)$$

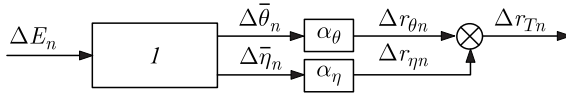


Рис. 8. Блок-схема температурной обратной связи: I — блок зависимости средних температур топлива и теплоносителя от мощности (блок-схема I представлена на рис. 7)

Температурные коэффициенты топлива α_θ и теплоносителя α_η определяются из сравнения смоделированных переходных процессов с зарегистрированными.

Можно предположить, что модель динамики с обратной связью, обусловленной только средними температурами топлива и теплоносителя, недостаточна. Для подтверждения этого предположения было проведено сравнение вычисленных переходных процессов с зарегистрированными. Блок-схема обратной связи, соответствующая этому случаю, показана на рис. 8.

Вычисленные с помощью модели переходные процессы зависят от значений температурных коэффициентов α_θ и α_η . Значения этих коэффициентов определены из условия наилучшего приближения смоделированного процесса изменения мощности реактора к зарегистрированному, обусловленному преднамеренными прямоугольными колебаниями реактивности (рис. 9). В эксперименте на реакторе ИБР-2М колебания реактивности были вызваны

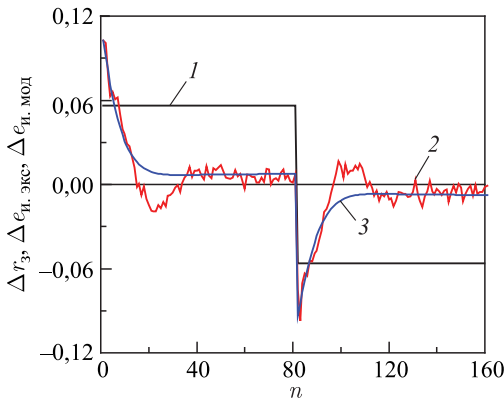


Рис. 9. Аппроксимация измеренного переходного процесса с учетом только температурной обратной связи. Переходные процессы при периодических прямоугольных колебаниях задающей реактивности Δr_3 (I) при средней мощности 2 МВт: 2 и 3 — период колебаний относительного отклонения энергии импульсы, зарегистрированного ($\Delta \epsilon_{и, экс.}$) и вычисленного ($\Delta \epsilon_{и, мод.}$) соответственно; n — номер импульсов мощности

быстрым перемещением за время между импульсами блока автоматического регулятора, выведенного из контура регулирования (реактор работал в режиме саморегулирования).

3.3. Полная обратная связь (температурная и мощностная). Недостаточное приближение вычисленного переходного процесса к зарегистрированному (см. рис. 9) подтверждает, что зависимость реактивности обратной связи от средних температур топлива и теплоносителя не отражает всю сложность процессов, обусловленных разогревом активной зоны. В связи с этим в обратную связь, обусловленную разогревом реактора, добавлены еще два канала мощностной обратной связи, каждый из которых характеризуется двумя параметрами — коэффициентом передачи и постоянной времени. Мощностная обратная связь описана следующими уравнениями:

$$\Delta r_P = \Delta r_{P1} + \Delta r_{P2}, \quad (27)$$

$$T_{P1} \frac{d\Delta r_{P1}}{dt} + \Delta r_{P1} = k_{P1} \Delta P, \quad T_{P2} \frac{d\Delta r_{P2}}{dt} + \Delta r_{P2} = k_{P2} \Delta P, \quad (28)$$

где k_{P1} , k_{P2} — коэффициенты передачи; T_{P1} , T_{P2} — постоянные времени каналов мощностной обратной связи.

На рис. 10 показана блок-схема мощностной обратной связи, где $W_{P1}(z)$, $W_{P2}(z)$ — дискретные передаточные функции, соответствующие уравнениям (28):

$$W_{P1}(z) = \frac{\Delta r_{P1}(z)}{\Delta E(z)} = \frac{k_{P1} T_n}{2T_{P1} + T_n} \frac{z + 1}{z - \frac{(2T_{P1} - T_n)}{(2T_{P1} + T_n)}}, \quad (29)$$

$$W_{P2}(z) = \frac{\Delta r_{P2}(z)}{\Delta E(z)} = \frac{k_{P2} T_n}{2T_{P2} + T_n} \frac{z + 1}{z - \frac{(2T_{P2} - T_n)}{(2T_{P2} + T_n)}}. \quad (30)$$

Значения параметров мощностной обратной связи определены из условия наилучшего приближения смоделированного переходного процесса мощности

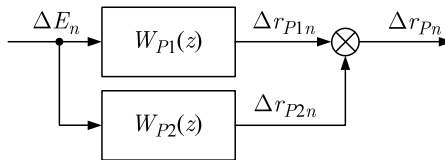


Рис. 10. Блок-схема модели быстрой мощностной обратной связи ИБР-2М

Таблица 2. Параметры обратной связи при средней мощности реактора 2 МВт и расходе теплоносителя 100 м³/ч (*j* — номер составляющей мощностной обратной связи)

Обратная связь	Параметр	Значение
Температурная	Температурный коэффициент, β_n /град:	
	топлива α_θ	-0,018
	теплоносителя α_η	-0,043
	Постоянная времени, с:	
	топлива T_θ	7,71
	теплоносителя T_η	1,20
Мощностная	Коэффициент передачи k_{Pj}, β_n /МВт	
	при $j = 1$	-7,63
	при $j = 2$	6,77
	Постоянная времени T_{Pj} , с	
	при $j = 1$	4,21
	при $j = 2$	3,26

реактора к зарегистрированному. Значения параметров обратной связи, соответствующие этому условию, приведены в табл. 2.

Ниже показаны переходные процессы мощности реактора (рис. 11), а также реактивности обратной связи и ее температурные и мощностные составляющие (рис. 12), вызванные прямоугольными колебаниями задающей ре-

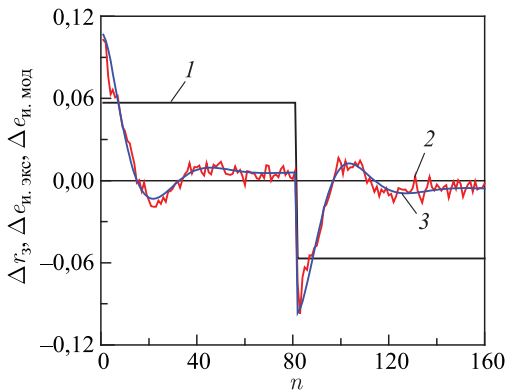


Рис. 11. Аппроксимация измеренного переходного процесса с учетом как температурной, так и мощностной обратной связи. Переходные процессы при прямоугольных колебаниях задающей реактивности Δr_z (1) для одного периода колебаний — зарегистрированного $\Delta \epsilon_{n, \text{экс}}$ (2) и вычисленного $\Delta \epsilon_{n, \text{мод}}$ (3) относительного отклонения энергии импульсов при мощности 2 МВт; n — номер импульсов мощности

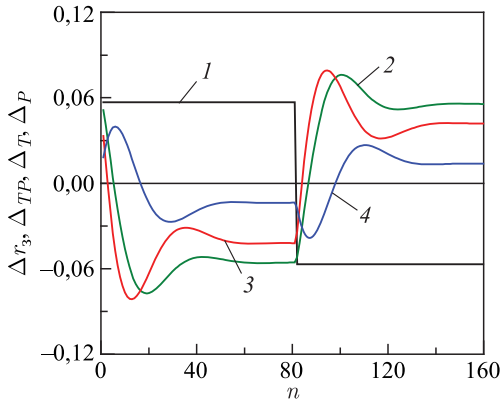


Рис. 12. Переходные процессы при прямоугольных колебаниях задающей реактивности Δr_3 (1) за период колебаний вычисленной суммарной реактивности обратной связи Δr_{TP} (2) и ее составляющих: температурной Δr_T (3) и мощностной Δr_P (4) обратной связи при средней мощности 2 МВт

активности. Анализ проведен при мощности реактора 2 МВт и расходе теплоносителя через активную зону $100 \text{ м}^3/\text{ч}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рассмотренном варианте модели динамики реактора ИБР-2М отдельно выделена температурная обратная связь в виде зависимости реактивности от средних температур топлива и теплоносителя. Показано, что реактивность обратной связи не может быть описана только этими составляющими. В связи с этим в модель введена также мощностная обратная связь в виде зависимости реактивности от мощности. Получены параметры обратной связи, при которых суммарный эффект температурной и мощностной обратной связи обеспечивает хорошее приближение смоделированного переходного процесса мощности к зарегистрированному. Отмечено, что физический смысл мощностной обратной связи требует дополнительного исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Pepelyshev Yu.N., Popov A.K., Sumkhuu D.* Model of Dynamics of the IBR-2M Pulsed Reactor for Study of Transient Processes in a Wide Range Change of Power // *Ann. Nucl. Energy.* 2015. V. 85. P. 488-493.

2. *Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д. и др.* Модель динамики импульсного реактора ИБР-2М для анализа быстрых переходных процессов // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 3(194). С. 682–686.
3. *Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д.* Оценка параметров мощностной обратной связи реактора ИБР-2М с помощью прямоугольных колебаний реактивности // АЭ. 2017. Т. 122, вып. 2. С. 63–68.
4. *Бондарченко Е. А., Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Экспериментальное и модельное исследование особенностей динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2 // ЭЧАЯ. 2004. Т. 35, вып. 4. С. 928–983.
5. *Bondarchenko E. A., Pepelyshev Yu. N., Popov A. K.* Temperature Dynamics Model of a Pulsed Fission Material Assembly // Ann. Nucl. Energy. 2004. V. 31, No. 6. P. 601–617.
6. *Чиркин В. С.* Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1968. С. 130.
7. *Ким Тхэ Гюн, Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д.* Методика теплофизического анализа твэла реактора ИБР-2. Сообщ. ОИЯИ Р13-2010-58. Дубна, 2010.
8. *Steiglitz K.* The Equivalence of Digital and Analog Signal Processing // Information and Control. 1965. V. 8. P. 455–467.
9. *Лем Г.* Аналоговые и цифровые фильтры. Расчет и реализация. М.: Мир, 1982. 592 с.
10. *Бондаренко И. И., Ставиский Ю. Я.* Импульсный режим работы быстрого реактора // АЭ. 1959. Т. 7, вып. 5. С. 417–420.

Получено 12 августа 2019 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 04.10.2019.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,41. Тираж 215 экз. Заказ № 59774.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/