

P13-2013-34

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

**МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ИБР-2М
ДЛЯ АНАЛИЗА БЫСТРЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Направлено в оргкомитет международной конференции «Математическое моделирование и вычислительная физика», Дубна, июль 2013 г.

Пепельшев Ю. Н. и др.

P13-2013-34

Модель динамики импульсного реактора ИБР-2М
для анализа быстрых переходных процессов

На базе программной системы MATLAB создана нелинейная модель динамики импульсного реактора ИБР-2М, связывающая значения переменных в дискретные моменты времени (в моменты появления импульсов мощности). Проведено тестирование модели посредством моделирования рассчитанных процессов в реакторе ИБР-2М, показавшее правильность модели. Получена предварительная оценка коэффициента передачи линейной части автоматического регулятора.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Pepelyshev Yu. N. et al.

P13-2013-34

Model of Dynamics of the IBR-2M Pulsed Reactor
for Analysis of Fast Transients

On the basis of the program system MATLAB the nonlinear dynamics model of the IBR-2M pulsed reactor which links values of variables at discrete moments (at moments of appearance of power pulses) is established. The testing by means of modeling calculated processes in the IBR-2M shows the correctness of the model. A preliminary estimate of the transfer coefficient of the linear part of the automatic regulator is obtained.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Импульсный реактор периодического действия ИБР-2М, представляющий собой модернизированный вариант реактора ИБР-2, пущен в эксплуатацию при средней мощности 2 МВт в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ (Дубна) в 2012 г.

Реактор генерирует короткие нейтронные импульсы (200 мкс на половине высоты) с периодом 0,2 и амплитудой 1830 МВт. Практически вся энергия, выделяемая за период, генерируется в импульсе (92 %).

Для оценки поведения реактора в нештатных ситуациях, которое нельзя зафиксировать экспериментально, а также для оценки параметров реактора, влияющих на его динамику, создана математическая модель динамики ИБР-2М, которая является развитием разработанной ранее модели динамики ИБР-2 [1, 2]. Новая модель динамики создана на базе программной системы MATLAB.

1. МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ РЕАКТОРА ИБР-2М

Для импульсного реактора существенна связь переменных (сигналов) лишь в дискретные моменты времени — в моменты появления импульсов мощности. В модели импульсы мощности представлены пропорциональными дельта-функциям. Модель осуществляет решение системы линейных и нелинейных алгебраических уравнений, которые связывают переменные, соответствующие двум соседним импульсам. В модели учтены следующие нелинейности: нелинейная зависимость коэффициентов передачи мощностной обратной связи (МОС) от реактивности МОС, нелинейная зависимость реактивности промежуточного регулятора (ПР) и автоматического регулятора (АР) от их положения в активной зоне, нелинейная зависимость энергии импульса мощности от реактивности реактора. Связь энергии импульса и реактивности в модели представлена в виде экспоненциальной зависимости. При таком представлении ошибка аппроксимации лежит в районе 5% для рабочего диапазона реактора, т. е. для диапазона, за пределами которого срабатывает аварийная

защита [2]. Линейные зависимости переменных отражены в модели соответствующими дискретными передаточными функциями.

Реактивность в модели выражена в долях β_n (бета импульсное) [3]. Такое выражение реактивности в импульсном реакторе аналогично выражению реактивности в долях в стационарном реакторе. Для реактора ИБР-2М $\beta_n = 1,6 \cdot 10^{-4}$.

Регулируемым параметром реактора является относительное отклонение энергии импульса мощности от базового значения этой энергии. В качестве базового принято среднее значение энергии импульса в стационарном режиме, когда мощность реактора (и энергия импульса) в среднем постоянна.

Входной величиной модели является возмущающая реактивность (отклонение реактивности, обусловленное внешними причинами), выходной — относительное отклонение энергии импульса от его базового (установившегося) значения.

В тексте используются следующие обозначения параметров:

Параметры с индексами «и» и «ф» соответствуют импульсу мощности и фону (интервалу между импульсами), с индексом n — n -му импульсу мощности, с индексом m — максимальным значением в импульсах реактивности, с индексом θ — мощностной обратной связи, с верхним индексом 0 — базовым значениям параметров, с индексами А и П — соответственно автоматическому и промежуточному регулятору. $\delta k, \rho$ — реактивность в абсолютных единицах и в долях β_n соответственно. Δ — отклонение параметра от его базового значения. $E_n, E_\phi, E = E_n + E_\phi$ — энергия импульса мощности, фона и полная за период импульсов T_n ; $k_\phi = E_\phi/E$ — доля энергии фона от полной энергии; \bar{P} — средняя мощность реактора. $S_i, S = \sum_i S_i$ — нормированная интенсивность источников запаздывающих нейтронов (выраженная в единицах мощности) соответственно группы i и суммарная. C_j — параметр нелинейности МОС ($j = 1, 2, 3$). L — положение стержня регулятора. Δe_n и $\Delta \tilde{e}_n$ — соответственно регулируемый параметр и его сглаженное значение. $W(z)$ — дискретные передаточные функции, связывающие z -изображения выходных и входных сигналов.

Используемые в модели относительные отклонения переменных определяются формулами

$$\Delta e_{in} = \frac{\Delta E_{in}}{E_n^0} = \left(\frac{E_{in}}{E_n^0} \right) - 1, \quad \Delta e_n = \frac{\Delta E_n}{E^0} = \left(\frac{E_n}{E^0} \right) - 1,$$

$$\Delta S_{in} = \frac{\Delta S_{in}}{S^0}, \quad \Delta S_n = \sum_i \Delta S_{in} = \left(\frac{\Delta S_n}{S^0} \right) - 1.$$

На рис. 1 в общем виде показана блок-схема модели для реактора, работающего в режиме поддержания нулевого отклонения энергии импульсов (режим стабилизации мощности).

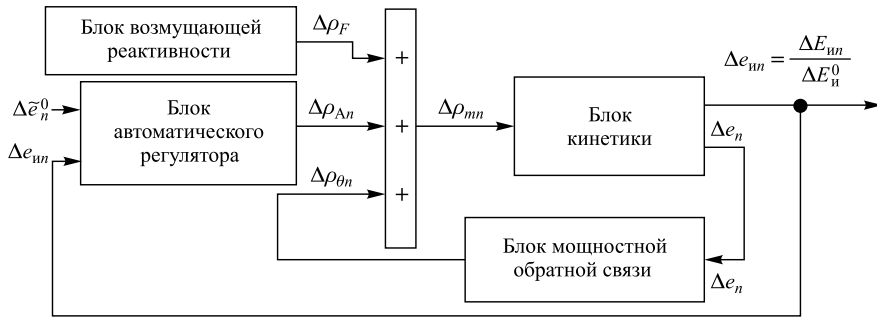


Рис. 1. Принципиальная блок-схема модели реактора ИБР-2М

Модель представляет собой замкнутую систему управления с прямым каналом, содержащим блок кинетики реактора, и двумя каналами обратной связи, содержащими блоки мощностной обратной связи и автоматического регулятора. Эти блоки более детально показаны на рис. 2–4.

На реакторе ИБР-2 длительность зарегистрированных переходных процессов, обусловленных преднамеренным изменением реактивности, как пра-

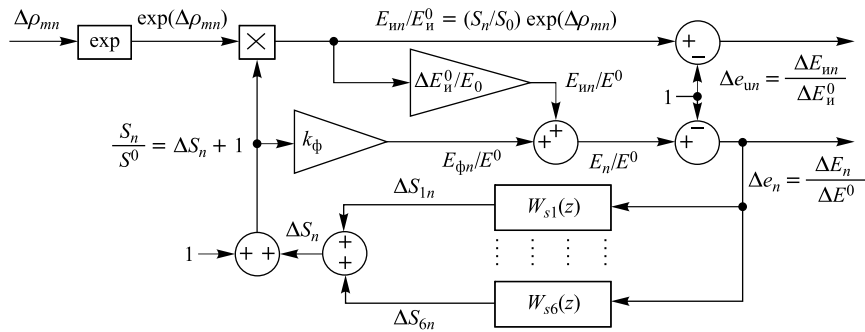


Рис. 2. Блок-схема кинетики

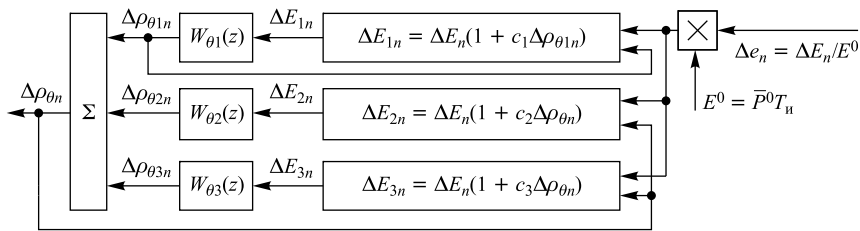


Рис. 3. Блок-схема модели мощностной обратной связи

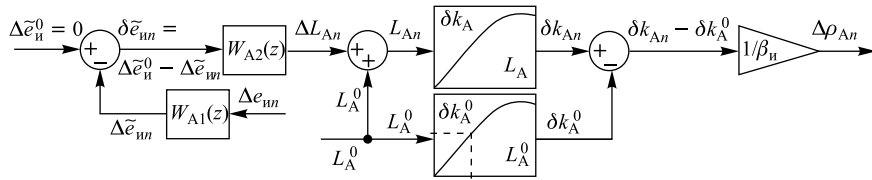


Рис. 4. Блок-схема автоматического регулятора

вило, не превосходила 60 с. Поэтому математическая обработка этих процессов позволила достаточно надежно оценить лишь так называемую быструю МОС. В модели ИБР-2 быстрая МОС была представлена тремя апериодическими звеньями, соединенными параллельно. Их коэффициенты передачи в общем случае были приняты нелинейными. Такая же модель МОС принята и для реактора ИБР-2М.

В модели предусмотрен также блок возмущающей реактивности. На его выходе можно создавать различные виды возмущений реактивности, в частности, возмущение, вызванное преднамеренным перемещением промежуточного регулятора. Полученная экспериментальным путем нелинейная зависимость ПР от его перемещения аппроксимирована полиномом седьмой степени (рис. 5). В качестве примера на рис. 6 показано, как на модели формируется возмущение реактивности, вызванное промежуточным регулятором. Это возмущение представлено в виде отклонения реактивности ПР от его базового значения, соответствующего исходному установившемуся ре-

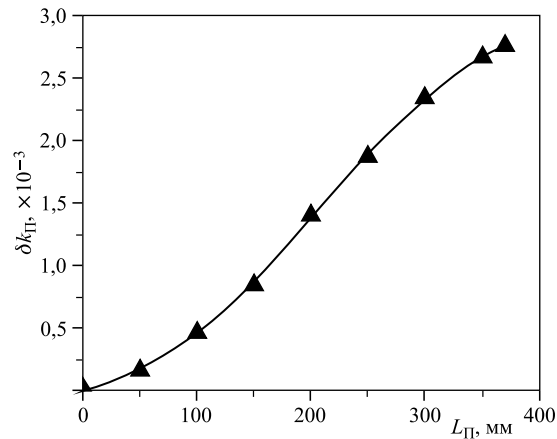


Рис. 5. Зависимость реактивности промежуточного регулятора от его положения (мм). Нулевое положение соответствует нижнему (выведенному) положению ПР. Точки — эксперимент, кривая — аппроксимация

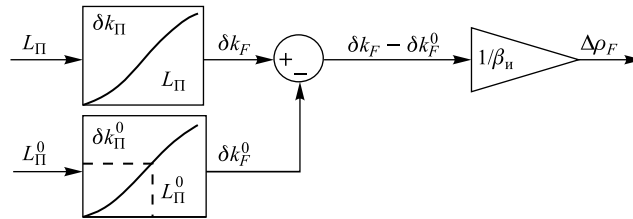


Рис. 6. Блок формирования возмущающей реактивности посредством ПР

жиму. Входными сигналами для блока, формирующего это отклонение реактивности, являются изменение во времени положения ПР и его базовое значение.

2. ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

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

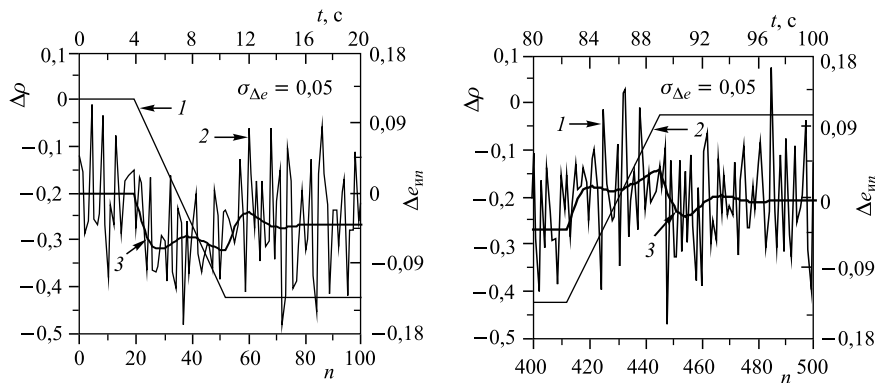


Рис. 7. Преднамеренное изменение реактивности промежуточным регулятором (1) и вызванное этим относительное отклонение энергии импульсов мощности: зарегистрированное (2) и смоделированное (3)

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 [4]. Полученные на модели ИБР-2М переходные процессы совпали с расчетными. В качестве примера на рис. 7 показаны зарегистрированные переходные процессы в реакторе ИБР-2М при средней мощности 2 МВт и смоделированные процессы.

3. ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА РЕАКТОРА ИБР-2М

Блок АР содержит блок сглаживания и собственно автоматический регулятор. Блок сглаживания представляет собой апериодическое звено. Он преобразует относительное отклонение энергии импульсов мощности Δe_n в виде дискретного сигнала в непрерывный сигнал $\Delta \tilde{e}_n$ ступенчатой формы по следующему закону:

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

где q — коэффициент сглаживания. На ИБР-2М установлено значение $q = 32$. Разность этого сигнала и его задающего значения $\delta \tilde{e}_n$ подается на АР. Автоматический регулятор включает в себя блок управления, шаговый двигатель, редуктор и стержень АР. Зависимость реактивности, обусловленной стержнем АР и его положением в активной зоне, нелинейная. В модели она аппроксимирована полиномом шестой степени (рис. 8). Все остальные элементы АР линейные и представлены в модели в виде интегрирующего звена с коэффициентом передачи k_{AL} . Входным сигналом этого линейного звена является разность задающего значения сглаженного отклонения и его текущего значения $\delta \tilde{e}_n$, выходным — отклонение перемещения стержня АР от его базового значения ΔL_A . Этому интегрирующему звену соответствует следующее уравнение:

$$\frac{\Delta L_{An} - \Delta L_{An-1}}{T_n} = k_{AL} \delta \tilde{e}_{in-1}.$$

На реакторе ИБР-2М, работавшем с автоматическим регулятором при средней мощности 1 МВт, был зарегистрирован достаточно длительный переходный процесс перемещения автоматического регулятора. Было проведено моделирование этого процесса на модели динамики. Начальное значение положения стержня АР, принятое в качестве базового, составляло $L_A^0 = 107$ мм (рис. 9). Аналогичные переходные процессы моделировались

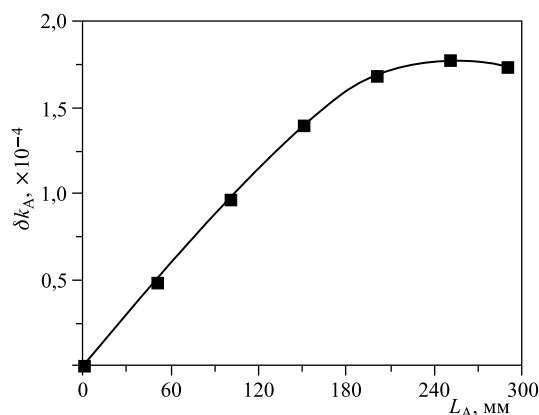


Рис. 8. Зависимость реактивности стержня AP в абсолютных единицах от его положения (точки — эксперимент, кривая — аппроксимация)

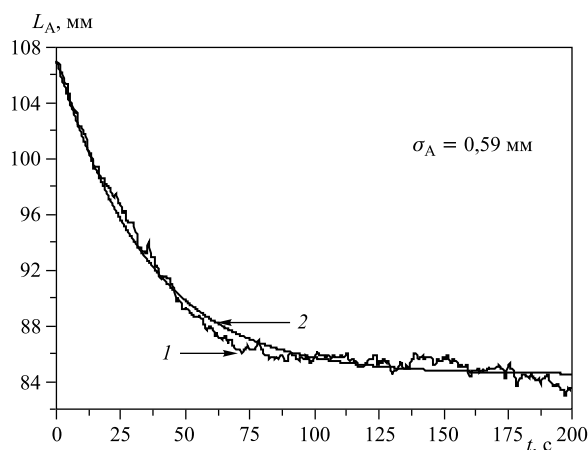


Рис. 9. Перемещение AP, зарегистрированное (1) и смоделированное (2) при $q = 32$

на модели динамики (с двумя каналами МОС) при различных значениях линейного коэффициента передачи AP k_{AL} . В результате определено наиболее вероятное значение коэффициента передачи AP $k_{AL} = 53,8$ мм/с, которому соответствует наименьшее среднеквадратическое отклонение смоделированного процесса от зарегистрированного (рис. 9).

Если нелинейность AP в районе $L_A^0 = 107$ мм аппроксимировать линейным звеном, то ему будет соответствовать коэффициент передачи $k_{AN} = 9,37 \cdot 10^{-7}$ мм $^{-1}$. Этому упрощенному варианту будет соответствовать

уравнение

$$\frac{\Delta\rho_{An} - \Delta\rho_{An-1}}{T_n} = \frac{k_{AL}k_{AN}}{\beta_n} \delta\tilde{\epsilon}_{nn-1},$$

где $\frac{k_{AL}k_{AN}}{\beta_n} = 0,315 \beta_n \text{ с}^{-1}$.

Очевидно, что при математической обработке переходных процессов, вызванных более резким изменением задающей реактивности, чем изменение посредством ПР, с помощью модели динамики можно будет получить более точные оценки параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе MATLAB создана нелинейная модель динамики импульсного реактора ИБР-2М, связывающая значения переменных в дискретные моменты времени (в моменты появления импульсов 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.

Из сравнения зарегистрированного и смоделированных переходных процессов получена предварительная оценка коэффициента передачи линейной части автоматического регулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Попов А. К. Основы управления ядерным реактором. Учебное пособие. М.: МГУ, 2012. 208 с.
3. Бондаренко И. И., Ставиский Ю. Я. Импульсный режим работы быстрого реактора // АЭ. 1959. Т. 7, вып. 5. С. 417–420.
4. Пепельшев Ю. Н., Попов А. К. Оценка параметров мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2М по переходным процессам. Препринт ОИЯИ Р13-2013-9. Дубна, 2013.

Получено 8 апреля 2013 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 19.06.2013.

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

Усл. печ. л. 0,69. Уч.-изд. л. 0,83. Тираж 245 экз. Заказ № 58012.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/