

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

Ю. Н. Пепельшев^{a,1}, А. К. Попов^{b,2}, Д. Сумхуу^{c,3}, Д. Сангаа^c

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^b Филиал МГТУ МИРЭА, Дубна, Россия

^c Институт физики и технологии АНМ, Улан-Батор

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 вычисления переходных процессов в реакторе ИБР-2М, показавшее правильность модели. Получена предварительная оценка коэффициента передачи линейной части автоматического регулятора.

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.

PACS: 28.20.Fc; 28.41.-i; 28.50.-k; 28.52.-s

ВВЕДЕНИЕ

Импульсный реактор периодического действия ИБР-2М (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 $T_n = 0,2$ с и амплитудой 1830 МВт. Энергия, выделяемая в импульсе E_n , составляет 92 % от полной энергии за период E , т.е. практически вся энергия выделяется в импульсе. Для оценки поведения реактора в нештатных ситуациях, которое нельзя зафиксировать экспериментально, а также для оценки параметров реактора, влияющих на его динамику, на базе программной системы MATLAB создана математическая модель динамики ИБР-2М, которая является развитием созданной ранее модели динамики ИБР-2 [1, 2].

¹E-mail: pepel@nf.jinr.ru

²E-mail: popov_ak@nf.jinr.ru

³E-mail: dsumkhuu@jinr.ru

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-функции. Модель осуществляет решение системы линейных и нелинейных алгебраических уравнений, которые связывают переменные, соответствующие двум соседним импульсам. В ней учтены следующие нелинейности: 1) зависимость коэффициентов передачи мощностной обратной связи (МОС) от ее реактивности; 2) зависимость реактивности промежуточного регулятора (ПР) и автоматического регулятора (АР) от их положения в активной зоне; 3) зависимости энергии импульса мощности от реактивности ИБР-2М. Принято, что энергия импульса зависит от реактивности экспоненциально. При таком представлении ошибка аппроксимации находится в районе 5% для рабочего диапазона реактора, т.е. для диапазона, за пределами которого срабатывает аварийная защита [2]. Линейные зависимости переменных отражены соответствующими дискретными передаточными функциями $W(z)$, основанными на z -преобразовании переменных. Реактивность в модели выражена в долях β_n (бета-импульсная) [3]. Выражение реактивности в импульсном реакторе аналогично выражению реактивности в долях β в стационарном реакторе. Для реактора ИБР-2М $\beta_n = 1,6 \cdot 10^{-4}$. Регулируемым параметром реактора является относительное отклонение энергии импульса мощности от ее базового значения. В качестве базового принято среднее значение энергии импульса в стационарном режиме, когда мощность реактора (и энергия импульса) в среднем постоянна.

На рис. 1, а показана блок-схема модели реактора ИБР-2М. Входной величиной является возмущающая реактивность $\Delta\rho_F$ (отклонение реактивности, обусловленное внешними причинами), выходной — относительное отклонение Δe_n энергии импульса от

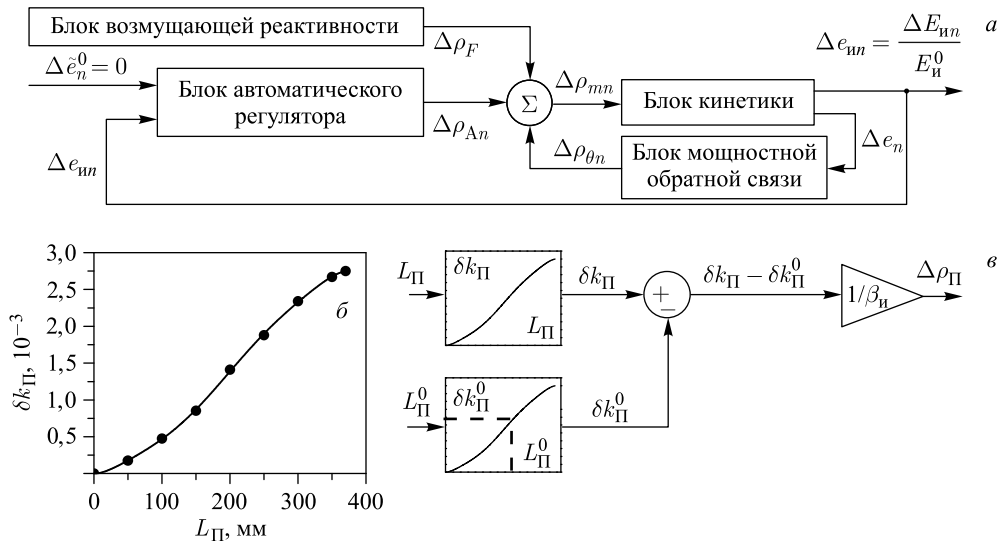


Рис. 1. а) Блок-схема модели реактора ИБР-2М. б) Зависимость реактивности ПР от его положения (точки — эксперимент, кривая — аппроксимация). в) Блок формирования возмущающей реактивности посредством ПР

его базового значения E_i^0 : $\Delta e_{ин} = \Delta E_{ин} / \Delta E_i^0$. В тексте использованы также следующие обозначения: $\Delta e = \Delta E / \Delta E^0$ — относительное отклонение Δe полной энергии за период от ее базового значения ΔE_i^0 ; $\Delta \tilde{e}_i$ — сглаженное значение регулируемого параметра; $\Delta \rho_\theta$, $\Delta \rho_A$, $\Delta \rho_m$ — соответственно реактивность МОС, АР и суммарная; L_A , L_Π — положение стержня АР и ПР соответственно; δk — реактивность в абсолютных единицах; n — номер импульса мощности.

Модель представляет собой замкнутую систему управления с прямым каналом (блок кинетики реактора) и двумя каналами обратной связи (блоки МОС и АР). В реакторе ИБР-2 длительность зарегистрированных переходных процессов, обусловленных преднамеренным изменением реактивности, как правило, не превышала 60 с, что позволило 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 создана для реактора ИБР-2М. Различные виды возмущений реактивности (в частности, вызванных преднамеренным перемещением ПР) формируются блоком возмущающей реактивности. Полученная экспериментальным путем нелинейная зависимость реактивности ПР от его перемещения аппроксимирована полиномом седьмой степени (рис. 1, б). На рис. 1, в показано, как формируется отклонение реактивности ПР от его базового значения, соответствующего исходному установившемуся режиму. Входными сигналами для блока, формирующего это отклонение реактивности, являются положение ПР (как функция времени) L_Π и его базовое значение L_Π^0 .

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,

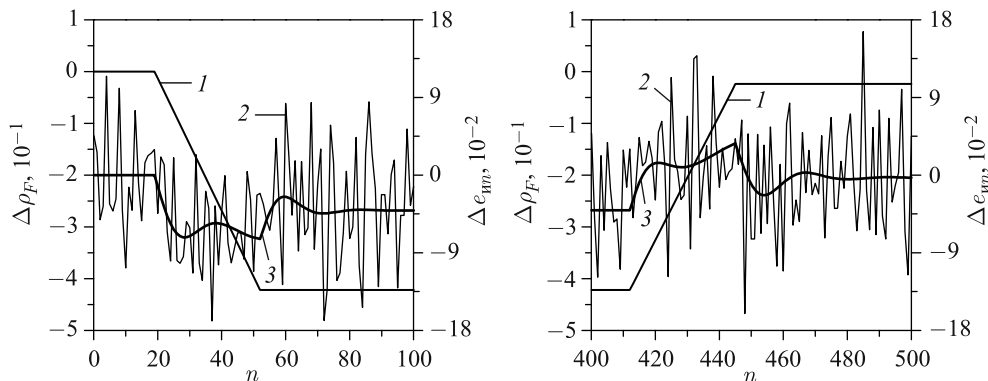


Рис. 2. Преднамеренное изменение реактивности ПР (1) и вызванное этим относительное отклонение энергии импульсов мощности: зарегистрированное (2) и смоделированное (3)

обусловленные перемещением вниз и вверх ПР. Переходные процессы, вызванные этими перемещениями ПР (при наличии существенных шумов), ранее были зарегистрированы. По этим процессам 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. 2 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 АР. Блок сглаживания, являющийся аperiodическим звеном [5], преобразует относительное отклонение энергии импульсов мощности $\Delta e_{ин}$ в виде дискретного сигнала в непрерывный сигнал $\Delta \tilde{e}_{ин}$ по следующему закону:

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

где q — коэффициент сглаживания. На ИБР-2М установлено значение $q = 32$. Разность этого сигнала и его задающего значения $\delta \tilde{e}_{ин}$ подается на АР, который включает в себя блок управления, шаговый двигатель, редуктор и стержень. Зависимость реактивности, обусловленной стержнем АР, от его положения в активной зоне нелинейная. В модели она аппроксимирована полиномом шестой степени (рис. 3, б). 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 $\delta \tilde{e}_{ин}$, выходным — отклонение

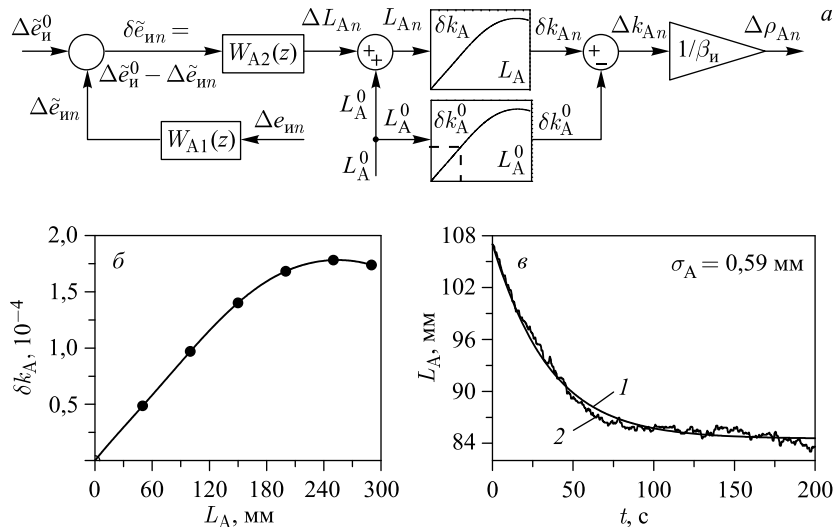


Рис. 3. а) Блок-схема АР. б) Зависимость реактивности стержня АР от его положения (точки — эксперимент, кривая — аппроксимация). в) Перемещение АР при $q = 32$: 1 — моделированное; 2 — зарегистрированное

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 АР при средней мощности 1 МВт, был зарегистрирован достаточно длительный переходный процесс перемещения АР. Было проведено моделирование этого процесса на модели динамики. Начальное значение положения стержня АР, принятое в качестве базового, составляло $L_A^0 = 107$ мм (рис. 3, в). Аналогичные переходные процессы вычислялись на модели динамики (с двумя каналами МОС) при различных значениях линейного коэффициента передачи АР k_{AL} . В результате определено наиболее вероятное значение коэффициента передачи АР $k_{AL} = 53,8$ мм/с, которому соответствует наименьшее среднеквадратическое отклонение смоделированного процесса от зарегистрированного (рис. 3, в).

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

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

где $k_{AL} k_{AN} / \beta_n = 0,315 \beta_n / \text{с}$. 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 программной системы 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 смоделированного переходных процессов получена предварительная оценка коэффициента передачи линейной части АР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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: Учеб. пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. 208 с.
3. *Бондарченко 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.
5. *Попов А. К.* Анализ устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при включенном автоматическом регуляторе. Сообщ. ОИЯИ Р13-98-275. Дубна, 1998.