



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

95-464

P13-95-464

А.К.Попов

УПРОЩЕННАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ
МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ
РЕАКТОРА ИБР-2

1995

В работах [1-3] рассмотрена линейная модель мощностной обратной связи реактора ИБР-2 в режиме стабилизации, характеризующимся небольшими отклонениями мощности от среднего значения. Импульсная переходная характеристика обратной связи описывалась тремя экспонентами, иначе говоря, мощностная обратная связь описывалась тремя дифференциальными уравнениями первого порядка. В результате этого реактивность в n -м импульсе определялась следующими соотношениями:

$$\rho_{rjn} = (\rho_{rjn-1} + E^0 \Delta e_{n-1} \frac{k_j}{T_j}) \exp(-T_n/T_j), \quad (1)$$

$$\rho_{rn} = \sum_{j=1}^3 \rho_{rjn}, \quad j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где ρ_{rn} , ρ_{rjn} - соответственно реактивность мощностной обратной связи в n -м импульсе и ее j -я составляющая, k_j и T_j - коэффициент передачи и постоянная времени j -й составляющей реактивности, T_n - период следования импульсов мощности, $\Delta e_{n-1} = (E_{n-1} - E^0)/E^0$ - относительное отклонение энергии $(n-1)$ -го импульса E_{n-1} от ее базового (среднего) значения E^0 .

Кинетика реактора описывалась нелинейной системой уравнений

$$\Delta e_n = (\Delta s_n + 1) \exp \rho_n - 1, \quad (3)$$

$$\rho_n = \rho_n^0 + \rho_{rn}, \quad (4)$$

$$\Delta s_n = \sum_{i=1}^6 (\Delta s_{in-1} + \frac{E^0}{S^0} \mu_i \lambda_i \Delta e_{n-1}) \exp(-\lambda_i T_n), \quad (5)$$

$$\frac{E^0}{S^0} = 1 / \sum_{i=1}^6 \mu_i \lambda_i \frac{\exp(-\lambda_i T_n)}{1 - \exp(-\lambda_i T_n)}, \quad (6)$$

где $\Delta s_n = (S_n - S^0)/S^0$ - относительное отклонение интенсивности источников запаздывающих нейтронов, соответствующее n -му импульсу, от среднего значения S^0 , $\Delta s_{in-1} = (S_{in-1} - S_i^0)/S^0$ - относительное отклонение i -й составляющей интенсивности источников, соответствующей $(n-1)$ -му импульсу, от ее среднего значения S_i^0 , отнесенное к $S^0 = \sum_{i=1}^6 S_i^0$, μ_i, λ_i - соответственно относительная доля и постоянная распада i -й составляющей запаздывающих нейтронов, ρ_n^0, ρ_n - соответственно задающая и результирующая реактивность в n -м импульсе.

Реактивность выражена в долях β_n . При этом, как следует из соотношения (3), не требуется знания самого значения β_n .

При симметричных периодических прямоугольных колебаниях реактивности ρ^0 зарегистрированные колебания мощности Δe заметно несимметричны. Эта несимметричность не может быть объяснена нелинейностью уравнения (3). Поэтому в работе [4] одна из трех коэффициентов передачи, соответствующий наиболее медленной составляющей реактивности мощностной обратной связи, был принят зависимым от отклонения температуры тепловыделяющих элементов $\Delta \Theta$ от его среднего уровня Θ^0 :

$$k_1 = k_1^0 + \left. \frac{\partial k_1}{\partial \Theta} \right|_{\Theta^0} \Delta \Theta, \quad (7)$$

где $k_1^0 = k_1(\Theta^0)$.

Вычисленные по уравнениям (1) - (6) колебания энергии Δe при периодических прямоугольных колебаниях реактивности ρ^0 с учетом зависимости k_1 от температуры (7) существенно меньше отличаются от измеренных колебаний энергии, чем без учета этой зависимости. Однако неудобством введения такого учета нелинейности мощностной обратной связи является необходимость введения дополнительных уравнений, описывающих температуру тепловыделяющих элементов.

Поэтому ниже рассмотрен более простой вариант учета нелинейности, который основан на предположении, что реактивность мощностной обратной связи пропорциональна температуре тепловыделяющих элементов. С учетом этого коэффициенты передачи мощностной обратной связи были представлены двумя членами ряда Тейлора:

$$k_j = k_j^0 + \left. \frac{\partial k_j}{\partial \rho_r} \right|_{\rho_r=0} \rho_r \quad (8)$$

или, иначе, произведением двух коэффициентов передачи - независимого от реактивности коэффициента обратной связи k_j^0 и зависимого k_j' :

$$\begin{aligned} k_j &= k_j^0 k_j', \\ k_j' &= 1 + \Delta k_j \rho_r, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\Delta k_j = \left. \frac{\partial k_j}{\partial \rho_r} \right|_{\rho_r=0} / k_j^0. \quad (10)$$

Таким образом, вместо выражения (1) использовалось следующее выражение:

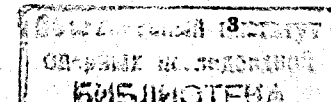
$$\rho_{rjn} = (\rho_{rjn-1} + E^0 \Delta e_{n-1} \frac{k_j^0 k_{jn-1}'}{T_j}) \exp(-T_n/T_j). \quad (11)$$

На рис. 1 показана структурная схема импульсного реактора, динамика которого описана уравнениями (2) - (6) и (9) - (11), связывающими значения переменных в n -м импульсе. По этим уравнениям динамики при прямоугольных колебаниях задающей реактивности рассчитывались значения относительных отклонений энергии импульсов при различных значениях девяти параметров: $T_1, T_2, T_3, k_1^0, k_2^0, k_3^0, \Delta k_1, \Delta k_2, \Delta k_3$.

Рассчитанные значения отклонений энергии являются аппроксимирующими и обозначены Δe_a . В качестве искоемых значений параметров $T_j, k_j^0, \Delta k_j (j = 1, 2, 3)$ принимались те их значения, при которых среднеквадратическое отклонение Δe от Δe_a минимально:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M (\Delta e_n - \Delta e_{an})^2} = \min, \quad (12)$$

где M - число импульсов за период колебаний. По указанной методике аппроксимировались замеренные в 1992 г. колебания энергии импульсов мощности для двух режимов работы реактора ИБР-2: при средней мощности 2 и 1,8 МВт. Полупериод колебаний был достаточно продолжительным и составил 16 с ($N = M/2 = 80$ импульсов), в результате чего значения интенсивности источников запаздывающих нейтронов в конце каждого полупериода были практически неизменны ($S_N = S_{N+1}, S_M = S_1$). Это позволило в соответствии с формулой (3) вычислить значения задающей реактивности в долях β_n по



двум соседним импульсам. Для номеров импульсов M и 1

$$\rho_1^{\circ} = 0.5 \ln \frac{\Delta e_1 + 1}{\Delta e_M + 1}, \quad (13)$$

а для номеров N и $N+1$:

$$\rho_2^{\circ} = 0.5 \ln \frac{\Delta e_N + 1}{\Delta e_{N+1} + 1}. \quad (14)$$

В качестве задающей реактивности ρ° было принято среднеарифметическое значение

$$\rho^{\circ} = 0.5(\rho_1^{\circ} + \rho_2^{\circ}). \quad (15)$$

В результате получились следующие значения. Для средней мощности реактора $P^{\circ} = E^{\circ}/T_{\text{н}} = 2$ МВт $\rho^{\circ} = 0,0618$ ($\rho_1^{\circ} = 0,0633, \rho_2^{\circ} = 0,0618$), а для $P^{\circ} = 1,8$ МВт $\rho^{\circ} = 0,059$ ($\rho_1^{\circ} = 0,0597, \rho_2^{\circ} = 0,0582$).

Значения параметров мощностной обратной связи и среднеквадратического отклонения получились следующими.

Для $P^{\circ} = 2$ МВт:

$$\begin{aligned} T_1 &= 0,2; & T_2 &= 3,9; & T_3 &= 7,7 \text{ с}; \\ k_1^{\circ} &= -0,4; & k_2^{\circ} &= 4,4; & k_3^{\circ} &= -9,7 \beta_u/\text{МВт}; \\ \Delta k_1 &= -4,04; & \Delta k_2 &= -5,05; & \Delta k_3 &= -5,05 \text{ 1}/\beta_u; \\ \sigma &= 3,14 \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (16)$$

Для $P^{\circ} = 1,8$ МВт:

$$\begin{aligned} T_1 &= 0,2; & T_2 &= 2,8; & T_3 &= 8,3 \text{ с}; \\ k_1^{\circ} &= -0,5; & k_2^{\circ} &= 2,2; & k_3^{\circ} &= -5,5 \beta_u/\text{МВт}; \\ \Delta k_1 &= -8,25; & \Delta k_2 &= -5,95; & \Delta k_3 &= -6,6 \text{ 1}/\beta_u; \\ \sigma &= 3,14 \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (17)$$

При расчетах значения $\mu_i (i = 1, \dots, 6)$ были приняты равными: 0,038; 0,28; 0,216; 0,328; 0,103; 0,035,

значения λ_i : 0,0129; 0,0311; 0,134; 0,331; 1,26; 3,21 1/с, период колебаний $T_{\text{н}} = 0,2$ с.

На рис.2 для средней мощности реактора 2 и 1,8 МВт показаны зарегистрированные значения Δe при прямоугольных колебаниях задающей реактивности ρ° . Там же показаны огибающие Δe_a и ρ_T , соответствующие указанным значениям девяти параметров мощностной обратной связи (16) и (17), при которых среднеквадратическое отклонение σ минимально. Из рис.2 видно, что предложенное нелинейное описание мощностной обратной связи дает хорошее приближение Δe_a к Δe .

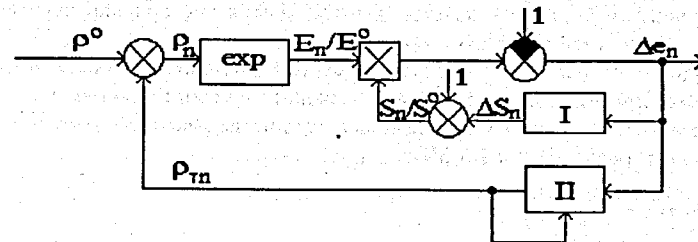


Рис. 1. Структурная схема импульсного реактора. I – блок обратной связи по запаздывающим нейтронам, II – блок нелинейной мощностной обратной связи, обусловленный разогревом реактора

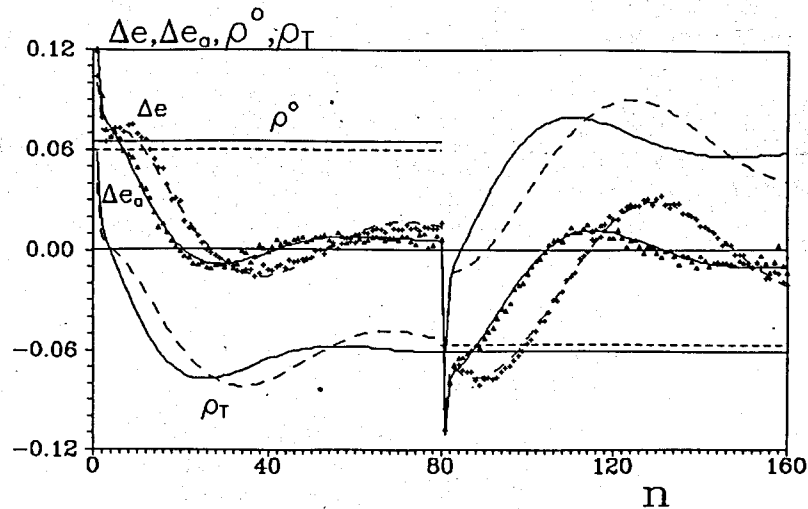


Рис. 2. Период колебаний измеренных Δe ($\Delta, +$) и вычисленных Δe_a ($-, \dots$) относительных отклонений энергии импульсов и вычисленной реактивности мощностной обратной связи ρ_T при прямоугольных колебаниях задающей реактивности ρ° . Средняя мощность реактора 2 МВт: (Δ, \dots) и 1,8 МВт ($+, -$)

Заключение

Мощностная обратная связь реактора ИБР-2 описана тремя дифференциальными уравнениями первого порядка с коэффициентами передачи, линейно зависящими от реактивности мощностной обратной связи.

Подобраны значения девяти параметров мощностной обратной связи, обеспечивающие наилучшее приближение вычисленных значений энергии импульсов к зарегистрированным при прямоугольных колебаниях задающей реактивности с периодом 32 с при средней мощности реактора 2 и 1,8 МВт.

Литература

1. Шабалин Е.П. и др. Импульсная характеристика обратной связи в реакторе ИБР-2. Препринт ОИЯИ, Р3-90-29, Дубна, 1990.
2. Попов А.К. Частотная и импульсная переходная характеристика мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ, Р13-90-203, Дубна, 1990.
3. Попов А.К. Оценка импульсной переходной характеристики мощностной обратной связи реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ, Р13-92-551, Дубна, 1992.
4. Камнионский В.Л. Нелинейность мощностной обратной связи в реакторе ИБР-2. Сообщение ОИЯИ, Р13-93-95, Дубна, 1993.