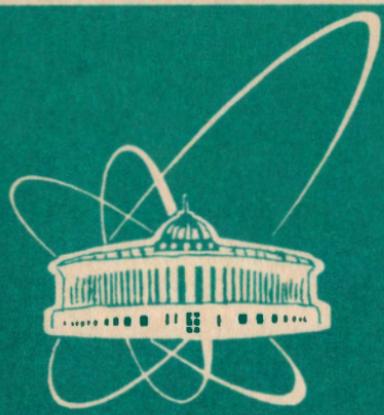


93-95



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

P13-93-95

В.Л.Камионский

**НЕЛИНЕЙНОСТЬ МОЩНОЙ
ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В РЕАКТОРЕ ИБР-2**

1993

Введение

В работе [1] проводится оценка мощностной обратной связи реактора ИБР-2 путем обработки методом передаточной функции измеренного периодического колебания мощности, вызванного периодическим прямоугольным колебанием реактивности одной определенной частоты (рис.1). При этом сравниваются значения параметров трехэкспоненциальной модели импульсной переходной характеристики (и.п.х.) – постоянные времени и мощностные коэффициенты обратной связи, вычисляемые при обработке колебаний мощности на различных задающих частотах реактивности. В результате из-за существенного разброса значений параметров, получающихся на различных частотах, и возможности описания и.п.х. различными наборами экспонент предлагается возможные со временем изменения в мощностной обратной связи оценивать не по значениям параметров трехэкспоненциальной модели, а по изменению самого вида и.п.х.

Неоднозначность результатов можно объяснить следующим образом. Во-первых, обрабатывались колебания мощности с длительностью полупериода, соизмеримой и даже меньшей постоянной времени обратной связи наиболее длинной экспоненты. Однако параметры этой экспоненты хорошо проявляются только при длительности полупериода колебания, превышающей ее постоянную времени [2]. Кроме этого, для того, чтобы отказаться от измерений на разных периодах модуляции реактивности, что предполагает классический подход метода передаточной функции, применимый в данном случае для дискретной системы, в предлагаемой методике для определения параметров и.п.х. используются нечетные гармоники высших частот, всегда присутствующие в колебаниях мощности с частотой ω . Поэтому необходимо выбрать значение ω (или N – числа импульсов в полупериоде), включающее наибольшее количество высших гармоник, что и соответствует длительному периоду колебания.

Во-вторых, значение амплитуды задающей реактивности, вычисляемое по формуле $\rho_0 = 0.5 \ln[(1 + e_1)/(1 + e_{2N})]$, где e_1, e_{2N} — относительные отклонения энергии от среднего уровня соответственно первого импульса мощности в положительном полупериоде колебаний реактивности и последнего в отрицательном полупериоде, на различных частотах ω получалось различным. Это, как справедливо замечено в [1], объясняется тем, что на высоких частотах ω возможна заметная ошибка в определении ρ_0 из-за неустановившегося значения мощности e_{2N} . Необходима стабилизация мощности на полупериоде колебания, т.е. как можно большее значение N .

В-третьих, в работе [1] предлагается для уменьшения влияния высших гармоник, обусловленных флуктуациями и не являющихся результатом периодического воздействия задающей реактивности, “сглаживать” исходные измеренные значения энергии импульсов мощности по формуле $\bar{e}_n = 0,25(e_{n-1} + 2e_n + e_{n+1})$. Но постоянная времени самой короткой из экспонент принятой модели обратной связи соизмерима с длительностью периода $T = 0,2$ с импульсов мощности реактора, а значит, в этом случае будет потеряна информация о параметрах этой экспоненты. Поэтому представляется единственно возможным для исключения влияния высших гармоник использовать значения энергии импульсов, усредненных на как можно большем числе измеряемых периодов колебаний.

Перечисленным выше условиям удовлетворяют эксперименты, проводимые последние годы на реакторе ИБР-2 с использованием метода оценки и.п.х. как решение “обратной задачи” [2]. Выбранный период колебания реактивности M равен 160 импульсам. При этом длительность полупериода (16 с) значительно превышает постоянную времени длинной экспоненты (в работе [3], где был использован традиционный метод передаточной функции, ее длительность составила 7 с), а значения энергии импульсов усредняются по нескольким тысячам периодов. При обработке экспериментов для описания и.п.х. (как и в [1]) используется линейная модель обратной связи, что, как будет показано ниже, также приводит к существенным ошибкам в определении значений постоянных времени и мощностных коэффициентов реактивности.

Определение параметров линейной модели мощностной обратной связи

На рис.1 приведены измеренные в 1992 году отклонения энергии импульсов от среднего значения для двух уровней мощности: 2 и 1,8 МВт. Обработка этих экспериментальных данных предлагаемой в [1] методикой (за исключением процедуры "сглаживания") приводит к получению параметров трехэкспоненциальной модели, которые значительно отличаются на двух уровнях мощности (табл.1).

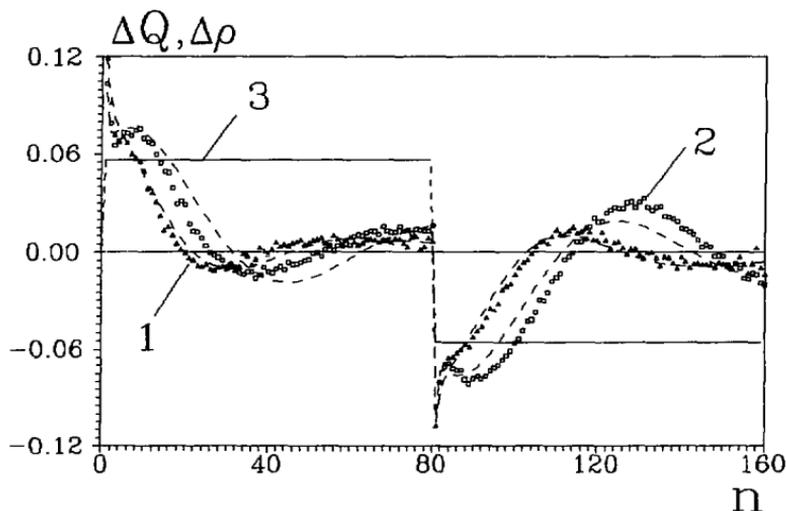


Рис. 1. Измеренные и вычисленные с использованием линейной модели обратной связи (пунктир) значения относительных отклонений энергии импульсов мощности ΔQ от среднего значения:

- 1 - для средней мощности 2.0 МВт,
- 2 - для средней мощности 1.8 МВт.
- 3 - задающая реактивность $\Delta \rho$

Т а б л и ц а 1

N эксп.	1.8 МВт		2 МВт	
	τ , с	$k, \beta_u/\text{МВт}$	τ , с	$k, \beta_u/\text{МВт}$
1	13.5	-5.57	10.1	-6.94
2	2.4	1.21	2.6	1.64
3	0.2	-0.45	0.4	-0.34

Пунктиром на рис.1 представлены результаты компьютерного моделирования динамики реактора ИБР-2 с использованием уравнений "импульсного" приближения [4] и полученных значений параметров экспонент обратной связи. При моделировании были использованы следующие рекуррентные соотношения для вычисления n -го отклонения импульса мощности q от среднего значения

$$q_n = \sum_{i=1}^6 S_{n,i} e^{e_n} - 1,$$

$$S_{n+1,i} = (S_{n,i} + \frac{\lambda_i \beta_i}{B} q_n) e^{-\lambda_i T}, \quad (1)$$

где $S_{n,i}$ - интенсивность источника запаздывающих нейтронов i -ой группы, λ_i, β_i - постоянные распада и доли запаздывающих нейтронов, B - нормирующий множитель $B = \sum_{i=1}^6 (\frac{\lambda_i \beta_i}{e^{\lambda_i T} - 1})$.

$$\rho_n = \rho_0 + \sum_{i=1}^3 \rho_{fn,i},$$

$$\rho_{fn+1,i} = (\rho_{fn,i} + \frac{k_i}{\tau_i} Q q_n) e^{-\frac{T}{\tau_i}}, \quad (2)$$

где ρ_n и $\rho_{fn,i}$ - соответственно суммарная реактивность в n -м импульсе мощности и i -я компонента реактивности обратной связи, выраженная в долях $\beta_u = 1.6 \cdot 10^{-4} K_{\text{эфф}}$. k_i и τ_i - мощностной коэффициент и постоянная времени i -й компоненты обратной связи, Q - среднее значение энергии импульса. В результате для 1.8 и 2 МВт среднеквадратические относительные отклонения σ/\sqrt{M} , где $\sigma^2 = \sum_{n=1}^M (e_n - q_n)^2$, характеризующие точность выбранной модели, соответственно равны $1.2 \cdot 10^{-3}$ и $3 \cdot 10^{-4}$.

Используемая модель динамики не обеспечивает совпадения экспериментальных значений e_n с вычисляемыми q_n в связи с существенной несимметричностью периодической функции энергии с импульсов

относительно среднего уровня. Кроме того, как было отмечено выше, на двух близких уровнях мощности реактора соответствующие вычисленные значения мощностных коэффициентов и постоянных времени обратной связи значительно отличаются друг от друга, чему трудно найти физическое объяснение.

Применимый к линейным системам частотный метод, предполагающий использование линеаризованных уравнений динамики (1), в котором энергия импульса e_n представляется в виде произведения $\sum_i S_{n,i} K_{un}$ [5], где $K_{un} = 1 + \rho_n$ (при значениях задающей реактивности ρ_0 , а значит, и ρ_n , $\ll 1$ это справедливо), не дает в нашем случае правильного результата, т.к. не учитывается несимметричный характер поведения функции энергии, проявляющийся даже при малых отклонениях задающей реактивности ($\rho_0 = 0.059 \beta_u$).

Существующую несимметричность функции e нельзя объяснить нелинейностью самих уравнений динамики (1). С другой стороны, как указано в [6], при работе быстрого реактора на большой мощности возможно возникновение ограниченных термических деформаций изгиба элементов активной зоны. В этом случае изгиб действует в виде нелинейной обратной связи и использование уравнений (2), т.е. модели линейной обратной связи приводит к значительным ошибкам в определении мощностных коэффициентов и постоянных времени.

Определение параметров мощностной обратной связи в предположении о зависимости мощностного коэффициента реактивности от температуры

В случае нелинейной мощностной обратной связи колебания температуры должны, вообще говоря, приводить к изменению значений всех мощностных коэффициентов реактивности. Но, учитывая, что наибольший вклад в мощностной эффект вносит первая, самая длинная экспонента, представим ее мощностной коэффициент как функцию температуры θ топливных элементов $k_1 = k_1(\theta)$. Так как колебания температуры в активной зоне незначительны при периодической моду-

ляции реактивности с амплитудой $0.059 \beta_u$ (максимальное отклонение $\epsilon \sim 10\%$), то можно записать

$$k_1(\theta_0 + \Delta\theta) = k_1(\theta_0) + \frac{\partial k_1(\theta_0)}{\partial \theta} \Delta\theta, \quad (3)$$

где $\Delta\theta$ - отклонение температуры от среднего уровня θ_0 . На рис.2 представлен вид функции θ для двух уровней средней мощности. При получении зависимости $\theta(q)$ была использована трехточечная модель теплообмена твэл-оболочка-натрий с усреднением по высоте активной зоны.

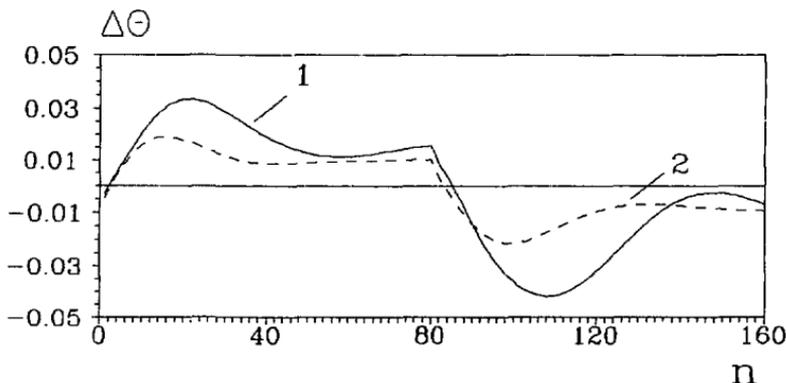


Рис. 2. Относительные отклонения температуры топливных элементов $\Delta\theta$ от среднего значения в течение одного периода колебания, соответствующие колебаниям мощности, представленным на рис. 1: 1 - для средней мощности 1.8 МВт, 2 - для средней мощности 2.0 МВт

Тогда реактивность обратной связи первой экспоненты будет записываться в виде

$$\rho'_{fn} = \rho_{fn} + \Delta\rho_{fn},$$

где $\Delta\rho_{fn} = 1/\tau_1 \frac{\partial k_1(\theta_0)}{\partial \theta} \Delta\theta Q q_{n-1} e^{-T/\tau_1}$ - нелинейная поправка для n -го импульса мощности. Учитывая нелинейную поправку $\Delta\rho_{fn}$, можно получить значения параметров мощностной обратной связи.

Выбор параметров, как и в [1], осуществляется с помощью метода наименьших квадратов; ищется минимум функции σ . При этом шесть значений τ_i и k_i связаны тремя уравнениями:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} W_{Ra}^*(j\omega) &= \operatorname{Re} W_R^*(j\omega), \\ \operatorname{Im} W_{Ra}^*(j\omega) &= \operatorname{Im} W_R^*(j\omega), \\ \operatorname{Re} W_{Ra}^*(j\pi \frac{N-1}{N}) &= \operatorname{Re} W_R^*(j\pi \frac{N-1}{N}), \end{aligned}$$

где W_R^* - частотная передаточная функция реактора, а W_{Ra}^* - аппроксимирующая частотная передаточная функция, $W_{Ra}^* = W_{Ra}^*(\tau_i, k_i)$. В нашем случае, имея две функции e для энергий 1.8 и 2 МВт и считая значения $\partial k_1(\theta)/\partial \theta$ близкими на этих уровнях мощности, можно подобрать τ_i , k_i и $\partial \bar{k}_1/\partial \theta = 0.5(\partial k_1(\theta_1)/\partial \theta + \partial k_1(\theta_2)/\partial \theta)$, где θ_1 и θ_2 - соответственно средние температуры для 1.8 и 2 МВт, такие, при которых среднеквадратическое отклонение $\bar{\sigma}/\sqrt{M}$ будет наименьшим. Здесь $\bar{\sigma}^2 = 0.5(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)$. При этом должно выполняться соотношение $k_1(\theta_1) + \partial \bar{k}_1/\partial \theta \cdot (\theta_2 - \theta_1) = k_1(\theta_2)$.

В результате будем иметь наборы параметров трехэкспоненциальной модели, соответствующие двум уровням мощности (табл. 2), и значение $\partial \bar{k}_1/\partial \theta = -0.025 \beta_u/K$. В табл. 2 также представлены значения τ_i и k_i , полученные в 1988 году с использованием метода передаточной функции [3], при котором параметры обратной связи определялись путем обработки зарегистрированных колебаний мощности в широком диапазоне частот.

Т а б л и ц а 2

N эксп.	1.8 МВт		2 МВт		2 МВт, 1988 г.	
	τ , с	k , $\beta_u/\text{МВт}$	τ , с	k , $\beta_u/\text{МВт}$	τ , с	k , $\beta_u/\text{МВт}$
1	8.8	-5.84	8.8	-7.44	7	-6.95
2	3.2	2.43	3.2	2.43	2	2.33
3	0.4	-0.33	0.4	-0.33	0.4	-0.64

На рис.3 представлены результаты моделирования динамики реактора с учетом нелинейной поправки мощностного коэффициента реактивности. Среднеквадратическое отклонение $\bar{\sigma}/\sqrt{M}$ составляет величину $1.8 \cdot 10^{-4}$, что существенно меньше значений σ/\sqrt{M} , полученных без учета нелинейности функции e .

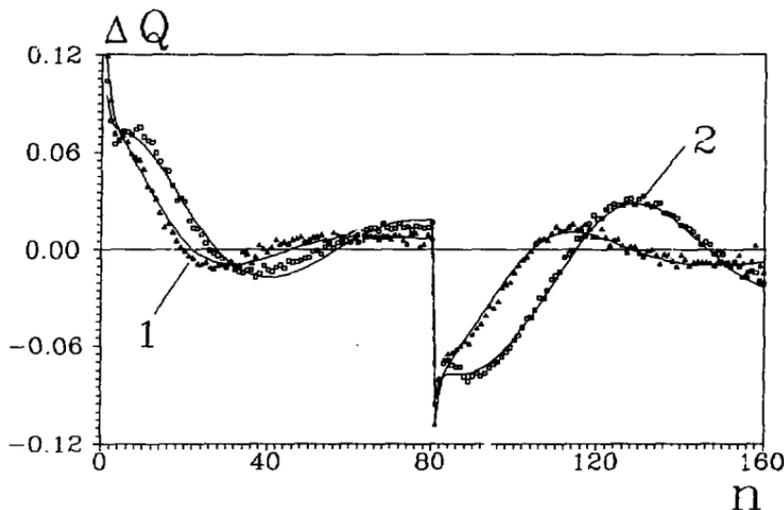


Рис. 3. Измеренные и вычисленные с учетом нелинейности обратной связи значения относительных отклонений энергии импульсов мощности ΔQ :
 1 - для средней мощности 2.0 МВт,
 2 - для средней мощности 1.8 МВт

Заключение

1. Методом частотной передаточной функции определены параметры трехэкспоненциальной модели мощностной обратной связи реактора ИБР-2 с учетом ее нелинейного характера.

2. Параметры экспонент, полученные ранее в результате обработки экспериментов методом решения "обратной задачи" без учета нелинейности мощностной обратной связи, имели тенденцию к изменению со временем. Однако исходя из имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что значения параметров мощ-

ностной обратной связи, вычисленные в 1988 году, и результаты обработки экспериментов 1992 года с учетом зависимости мощностного коэффициента реактивности от температуры, близки и со временем практически не изменились.

Литература

- [1] Попов А.К. - Сообщение ОИЯИ Р13-92-551, Дубна, 1992.
- [2] Шабалин Е.П. и др. - Препринт ОИЯИ Р3-90-29, Дубна, 1990.
- [3] Попов А.К. - Сообщение ОИЯИ Р13-90-203, Дубна, 1990.
- [4] Шабалин Е.П. - Препринт ОИЯИ Р11-90-219, Дубна, 1990.
- [5] Попов А.К. - Сообщение ОИЯИ Р13-85-839, Дубна, 1985.
- [6] Сандмайер А.Г. - Кинетика и стабильность реакторов на быстрых нейтронах. М., Госатомиздат, 1963, с.73.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 марта 1993 года.