



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

95-463

P3-95-463

А.К.Попов

ИМПУЛЬСНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ
РЕАКТОРА ИБР-2

1995

Исходные уравнения.

Для оценки устойчивости и исследования переходных процессов импульсного реактора удобно исходить из уравнений, выраженных в относительных единицах. В связи с этим известные уравнения кинетики одноточечной модели реактора

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{\tau} n + \sum_i \lambda_i C_i \\ \frac{dC_i}{dt} &= \frac{\beta_i}{\tau} n - \lambda_i C_i \\ i &= 1, \dots, 6 \end{aligned} \quad (1)$$

приведены к безразмерному виду

$$\begin{aligned} T_0 \frac{dP}{dt} &= \frac{\epsilon}{\beta} P + S \\ S &= \sum_{i=1}^6 S_i \\ T_i \frac{dS_i}{dt} + S_i &= \mu_i P \\ i &= 1, \dots, 6. \end{aligned} \quad (2)$$

В этих уравнениях n – плотность нейтронов, \bar{n} – средняя плотность нейтронов, β_i, β – доля запаздывающих нейтронов группы i и суммарная, ρ – реактивность, $\epsilon = \rho - \beta$ – реактивность по мгновенным нейтронам, $P = n/\bar{n}$ – мощность реактора в долях от средней мощности, $S_i = \tau \lambda_i C_i / (\beta \bar{n})$, S – "мощность" источников запаздывающих нейтронов группы i и суммарная, $T_0 = \tau/\beta$, $T_i = 1/\lambda_i$ – соответственно постоянные времени мгновенных нейтронов и запаздывающих нейтронов группы i , τ – эффективное время жизни мгновенных нейтронов, $\mu_i = \beta_i/\beta$ – относительная доля запаздывающих нейтронов группы i , C_i, λ_i – соответственно концентрация и постоянная распада источников запаздывающих нейтронов группы i , t – время.

Расчет импульсного коэффициента передачи

Импульс мощности порождается импульсом реактивности, обусловленным поворотом основного подвижного отражателя (ОПО). Реактивность ОПО $\epsilon_{\text{ОПО}}$ как функция угла смещения ОПО относительно физического центра реактора $\varphi_{\text{ОПО}}$ (рис. 1) описывалась в интервале $-\varphi_\phi \div \varphi_\phi$ сопряженными парабололами [1].

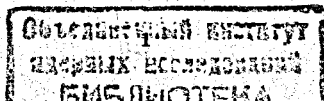
$$\begin{aligned} \text{При } -\varphi_n \leq \varphi_{\text{ОПО}} \leq \varphi_n & \quad \epsilon_{\text{ОПО}} = -\alpha_\phi \varphi_{\text{ОПО}}^2 \\ \text{При } \varphi_n \leq \varphi_{\text{ОПО}} \leq \varphi_\phi & \quad \epsilon_{\text{ОПО}} = -\Delta K_{\text{ОПО}} + \alpha_\phi (\varphi_\phi - \varphi_{\text{ОПО}})^2 \\ \text{При } -\varphi_\phi \leq \varphi_{\text{ОПО}} \leq -\varphi_n & \quad \epsilon_{\text{ОПО}} = -\Delta K_{\text{ОПО}} + \alpha_\phi (\varphi_{\text{ОПО}} + \varphi_\phi)^2 \end{aligned}$$

Здесь $\Delta K_{\text{ОПО}}$ – эффективность ОПО в абсолютных единицах, $\varphi_n = 4^\circ$, $\alpha_\phi = 3 \cdot 10^{-4}$ град⁻², $\varphi_\phi = 20,8^\circ$, $\alpha_\phi \varphi_\phi = 0,715 \cdot 10^{-4}$ град⁻². Последние два параметра вычислены по формулам $\varphi_\phi = \Delta K_{\text{ОПО}} / (\alpha_\phi \varphi_n)$, $\alpha_\phi \varphi_\phi = \alpha_\phi \varphi_n / (\varphi_\phi - \varphi_n)$.

Реактивность реактора в течение импульса реактивности представлялась суммой:

$$\epsilon = \epsilon_m + \epsilon_{\text{ОПО}}, \quad (3)$$

где ϵ_m – наибольшее значение реактивности, достигаемое в течение импульса реактивности.



Энергия E , выделяемая в течение импульса реактивности, представлялась в виде произведения:

$$E = SM, \quad (4)$$

где S — "мощность" источников запаздывающих нейтронов, соответствующая началу импульса реактивности (углу $-\varphi_\beta$), M — импульсный коэффициент передачи, представляющий из себя нелинейную функцию от ϵ_m .

Зависимость M от ϵ_m существенно нелинейна. Однако зависимость $\ln M$ от ϵ_m в широком диапазоне значений E близка к линейной. На рис. 2 показана зависимость $M(\epsilon_m)$ в логарифмическом масштабе, рассчитанная для диапазона ϵ_m от $-0,0208$ до $0,0015$ абсолютных единиц реактивности. При расчетах было принято, что скорость ОПО номинальная 1500 об/мин. $\Delta K = 2,5 \cdot 10^{-2}$ абсолютных единиц реактивности, $\tau = 6 \cdot 10^{-8}$ с, $\beta = 2,16 \cdot 10^{-3}$. Параметры шести групп запаздывающих нейтронов были приняты следующими [2]:

$$\begin{aligned} \mu_i &= 0,038; 0,28; 0,216; 0,328; 0,103; 0,035; \\ \lambda_i &= 0,0129; 0,0311; 0,134; 0,331; 1,26; 3,21. \end{aligned}$$

Рис. 2 относится к указанным выше значениям ΔK , τ и β , принятым в качестве базовых. Были проведены расчеты также при варьировании значений этих параметров. Расчеты при различных ΔK (от $2,25 \cdot 10^{-2}$ до $3,5 \cdot 10^{-2}$) не привели к каким-либо заметным отклонениям по сравнению с базовым значением $2,5 \cdot 10^{-2}$.

Импульсный коэффициент передачи, рассчитанный для τ и β , отличающихся на $\pm 10\%$ от базовых значений, показан на рис. 3. Из рис. 3 видно, что ошибка в оценке τ приводит к существенно большему (в четыре раза) отклонению $\lg M$ от его базового значения, чем такая же ошибка в оценке β . Аналогичные результаты получены также при варьировании значения α_φ (крутизна пика импульса реактивности) на $\pm 10\%$ при сохранении ширины импульса реактивности φ_β .

Два варианта аппроксимации нелинейности

При исследовании некоторых аварийных режимов работы реактора, характеризующихся очень широким диапазоном изменения реактивности [1], приходится использовать нелинейную зависимость M от ϵ_m (рис. 2). При исследовании же обычных режимов (поддержание или медленное изменение уровня мощности) возможны различные аппроксимации нелинейных зависимостей.

При достаточно широком диапазоне отклонения E относительно базового значения E^0 допустима линейная аппроксимация функции $\ln M(\epsilon_m)$

$$\ln M - \ln M^0 \approx \Delta \epsilon_m / \beta_u = \Delta \epsilon_m \beta_u, \quad (5)$$

т.е. приемлема формула

$$M/M^0 \approx \exp \Delta \epsilon_m \beta_u, \quad (6)$$

где

$$M^0 — \text{базовое отклонение } M, \quad \Delta \epsilon_m \beta_u = \Delta \epsilon_m / \beta_u = (\epsilon_m - \epsilon_m^0) / \beta_u \quad (7)$$

отклонение реактивности, выраженное в долях β_u . При этом,

$$\beta_u = 1 \left/ \frac{d \ln M}{d \epsilon_m} \right|_{\epsilon_m^0} = M^0 \left/ \frac{d M}{d \epsilon_m} \right|_{\epsilon_m^0} \quad (8)$$

Импульсная доля запаздывающих нейтронов β_u была введена в работе [3] с тем, чтобы по аналогии со стационарным реактором, в котором в качестве единиц измерения реактивности используются доли β , а в импульсном реакторе — доли β_u .

Нулевым индексом в приведенных формулах помечены базовые значения переменных, соответствующие режиму работы со стабильными импульсами мощности.

Базовое значение

$$M^0 \approx \frac{1 - \beta}{\sum_{i=1}^6 \frac{\mu_i}{T_i} \frac{\exp(-T/T_i)}{1 - \exp(-T/T_i)}}, \quad (9)$$

где $\epsilon_\phi < 0$ — реактивность между импульсами мощности (реактивность фона). Выражение (9) вытекает из уравнений (2) и (4) при представлении импульса мощности в виде дельта-функции и включении энергии, выделяемой между импульсами, в энергию, выделяемую в течение импульса мощности.

Значение M^0 может быть вычислено по замеряемым значениям энергии, выделяемой за период T :

$$M^0 \approx T \left(1 - \frac{\beta}{-\epsilon_\phi}\right) \approx \frac{E^0}{P^0}. \quad (10)$$

Соотношение (10) получено из следующих соображений. При работе ИБР-2 со стабильным уровнем мощности при периоде импульсов $T = 0,2$ с для запаздывающих нейтронов групп $i = 1, \dots, 4$ $T_i \gg T$, а для $i = 5, 6$ $\mu_i \ll 1$. С учетом этого знаменатель в формуле (9) примерно равен $1/T$, а из двух последних уравнений системы (2) следует, что $S^0 \approx \bar{P}^0$, где \bar{P}^0 — средняя мощность за период, т.е. вся энергия, выделяемая за период и деленная на T .

В таблицу 1 сведены значения M^0 , ϵ_m^0 и β_u , вычисленные как для базовых значений $\tau = \tau^0 = 6 \cdot 10^{-8}$ с и $\beta = \beta^0 = 2,16 \cdot 10^{-3}$, так и для τ и β , отличающихся от базовых на $\pm 10\%$. Из таблицы видно, что ошибка в оценке β слабо влияет на M^0 ; ошибка в оценке τ влияет на ϵ_m^0 и β_u намного сильнее, чем аналогичная ошибка в оценке β .

С учетом принятых допущений уравнения кинетики (2) можно привести к уравнениям, связывающим переменные в k -м и $(k-1)$ -м импульсах:

$$\begin{aligned} \frac{E(k)}{E^0} &= \frac{S(k)}{S^0} \exp \Delta \epsilon_m \beta_u(k), \\ S_i(k) &= [S_i(k-1) + \frac{\mu_i}{T_i} E(k-1)] \exp(-T/T_i), \\ S(k) &= \sum_{i=1}^6 S_i(k), \\ S^0 &= \sum_{i=1}^6 \frac{\mu_i}{T_i} \frac{\exp(-T/T_i)}{1 - \exp(-T/T_i)} E^0. \end{aligned} \quad (11)$$

Для режима стабилизации, когда отклонение энергии импульсов от среднего уровня составляет единицы процента, допустимо линеаризовать саму формулу (4), что приводит к следующему выражению:

$$\frac{\Delta E(k)}{E^0} = \frac{\Delta S(k)}{S^0} + \Delta \epsilon_m \beta_u(k), \quad (12)$$

где $\Delta E(k) = E(k) - E^0$, $\Delta S(k) = S(k) - S^0$.

На рис. 4 показаны структурные схемы импульсного реактора нулевой мощности, т.е. без учета обратной связи, вызванной разогревом реактора. Рис. 4а соответствует уравнениям

Таблица 1

τ	β	$0,9\beta^\circ$	β°	$1,1\beta^\circ$
$0,9\tau^\circ$	M°	0,184	0,182	0,180
	ϵ_m°	$0,99 \cdot 10^{-3}$	$0,97 \cdot 10^{-3}$	$0,95 \cdot 10^{-3}$
	β_u	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$1,49 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-4}$
τ°	M°	0,184	0,182	0,180
	ϵ_m°	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$
	β_u	$1,57 \cdot 10^{-4}$	$1,59 \cdot 10^{-4}$	$1,61 \cdot 10^{-4}$
$1,1\tau^\circ$	M°	0,184	0,182	0,180
	ϵ_m°	$1,14 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$
	β_u	$1,67 \cdot 10^{-4}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$1,71 \cdot 10^{-4}$

(11), если в них перейти от переменных к отклонениям их от базовых значений. Рис. 4б соответствует линеаризованной системе уравнений, когда вместо первого уравнения в системе (11) рассматривается выражение (12). На рис. 4 помечены импульсные частотные передаточные функции, связывающие фурье-изображения $s^*(j\bar{\omega})$ и $e^*(j\bar{\omega})$ переменных $\Delta S/S^\circ$ и $\Delta E/E^\circ$ [4]:

$$W_s^*(j\bar{\omega}) = \frac{s^*(j\bar{\omega})}{e^*(j\bar{\omega})} = \frac{\sum_{i=1}^6 \mu_i \frac{\exp(-T/T_i)}{T_i \exp(j\bar{\omega}) - \exp(-T/T_i)}}{\sum_{i=1}^6 \mu_i \frac{\exp(-T/T_i)}{T_i (1 - \exp(-T/T_i))}} \quad (13)$$

где $\bar{\omega} = \omega T$ - безразмерная частота ($0 \leq \bar{\omega} \leq \pi$).

Оценка ошибок аппроксимации

При использовании формулы (12) ошибка аппроксимации, например, в 5% достигается, если M изменяется от значения M° до $0,8M^\circ$ или до $1,4M^\circ$. При использовании же формулы (6) та же ошибка достигается при существенно больших изменениях M : до $0,4M^\circ$ или до $2,9M^\circ$. Соответственно, ошибка аппроксимации в 10% при использовании выражения (12) достигается при $0,7M^\circ$ и $1,7M^\circ$, а при использовании выражения (6) - $0,3M^\circ$ и $4,5M^\circ$. Таким образом, в отличие от аппроксимации (6) формула (12) приемлема лишь для достаточно узкого диапазона изменений реактивности.

Итак, неизбежные ошибки в оценке $\tau, \beta, \alpha_\varphi$ существенно влияют на импульсный коэффициент передачи. Это подтверждает нецелесообразность измерения реактивности ни в абсолютных единицах, ни в долях β , как в стационарном реакторе. Достаточно надежно можно оценивать лишь отклонение реактивности от базового значения, выраженное в долях β_u в соответствии с формулой (5).

Оценка эффективности автоматического регулятора

При измерении реактивности в долях β_u знание самого значения β_u необязательно, поскольку β_u не входит явно в уравнения кинетики. Реактивность автоматического регулятора (АР) в долях β_u достаточно надежно вычисляется путем обработки проведенных на ИБР-2 экспериментов.

В 1988 г. были зарегистрированы последовательности колебаний энергии импульсов ИБР-2 под воздействием колебаний с разными частотами стержня автоматического регулятора АР. Наибольшее число периодов вынужденных колебаний было зарегистрировано при частоте 2,5 импульса в секунду: по 2000 периодов для размахов (удвоенной амплитуды) колебаний АР, равных 5, 7 и 9 шагам. Один шаг АР (1,67 мм перемещения стержня АР) соответствовал перемещению на один шаг его приводного двигателя. Частота следования импульсов мощности составляла 5 имп./с, средняя мощность реактора номинальная - 2 МВт, расход теплоносителя также номинальный - 90 м³/час.

Колебания с частотой в два раза меньшей частоты следования импульсов мощности представляются наиболее подходящими для лучшей оценки реактивности одного шага АР в силу наименьшего дрейфа постоянной составляющей мощности реактора и наибольшего числа периодов колебаний за время эксперимента.

При размахах колебаний АР 5, 7 и 9 шагов значения относительных отклонений энергии импульсов мощности от среднего значения ($\Delta E/E^\circ$) составили соответственно $\pm 0,0367$, $\pm 0,0514$, $\pm 0,067$. В результате вычислений реактивность одного шага АР составила $0,0136\beta_u$ для размахов колебаний АР 5 и 7 шагов и $0,0138\beta_u$ для 9 шагов. При этом использовалась трехэкспоненциальная модель импульсной характеристики мощностной обратной связи с коэффициентами передачи $-6,95; 2,33; -0,64 \beta_u/\text{МВт}$ и постоянными времени 7; 2; 0,4 с [4]. Те же вычисления без учета мощностной обратной связи дали завышенную на 12% оценку реактивности одного шага АР.

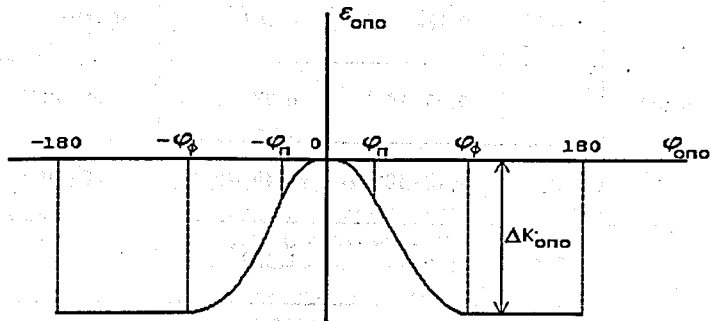


Рис. 1. Реактивность основного подвижного отражателя.
 $\epsilon_{\text{опo}}$ — в абсолютных единицах, $\varphi_{\text{опo}}$ — в градусах

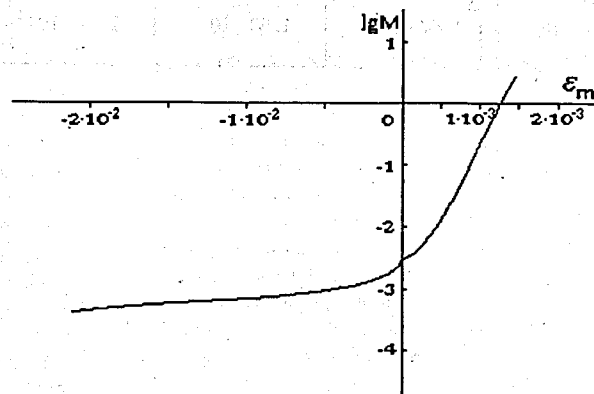


Рис. 2. Импульсный коэффициент передачи при базовых значениях $\Delta K, \tau, \beta$

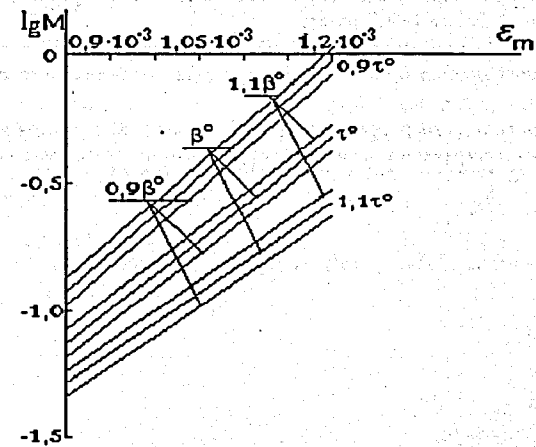


Рис. 3. Импульсный коэффициент при варьировании параметров τ и β .
 $\tau^\circ = 6 \cdot 10^{-8} \text{ с}$, $\beta^\circ = 2,16 \cdot 10^{-3}$

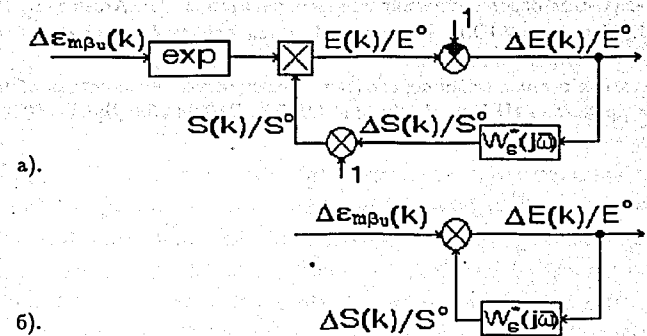


Рис. 4. Структурная схема импульсного реактора нулевой мощности:
 а) при экспоненциальной аппроксимации параметра M в уравнении (4),
 б) при линеаризации уравнения (4)

Выводы

1. Линеаризация нелинейного уравнения в системе уравнений кинетики допустима при умеренных отклонениях энергии импульса мощности от среднего значения. Так линеаризация приводит к ошибке в 10% относительно исходного уравнения, если энергия импульса увеличивается на 70% относительно исходного стабильного уровня.

2. Та же ошибка при экспоненциальной аппроксимации достигается при существенно большем увеличении энергии импульса (в 4,5 раза).

3. Расчеты, учитывающие возможные ошибки в оценке исходных параметров, подтверждают целесообразность использования $\beta_{\text{и}}$ в качестве меры реактивности в импульсном реакторе.

4. Реактивность автоматического регулятора ИБР-2 в долях $\beta_{\text{и}}$ достаточно надежно вычисляется, учитывая результаты экспериментов, проведенных при колебаниях АР с частотой в два раза меньшей частоты импульсов.

Литература.

1. Попов А.К. Переходные процессы в реакторе ИБР-2 при самопроизвольном снижении скорости дополнительного подвижного отражателя. Сообщение ОИЯИ, Р3-91-512, Дубна, 1991.
2. Кипин Дж.Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1967.
3. Бондаренко И.И., Ставиский Ю.Я. Импульсный режим работы быстрого реактора. Атомная энергия, т.7, вып.5, с.417, 1959.
4. Попов А.К. Частотная и импульсная переходная характеристики мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ, Р13-90-203, Дубна, 1990.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 ноября 1995 года.