

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

РЗ-95-463

А.К.Попов

ИМПУЛЬСНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ
РЕАКТОРА ИБР-2

УДК 271.9.1

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].

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

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

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 $-\varphi_\delta$), 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 значений α_φ (крутизна лика импульса реактивности) на $\pm 10\%$ при сохранении ширины импульса реактивности φ_δ .

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,

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

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

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

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 включения энергии, выделяемой между импульсами, в энергию, выделяемую в течение импульса мощности.

Значение M^0 может быть вычислено по замеренным 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

(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]:

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

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 $\tau, \beta, \alpha_\omega$ 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 или этики. 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.

Таблица 1

τ \ / \ β	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	$1,67 \cdot 10^{-4}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$1,71 \cdot 10^{-4}$

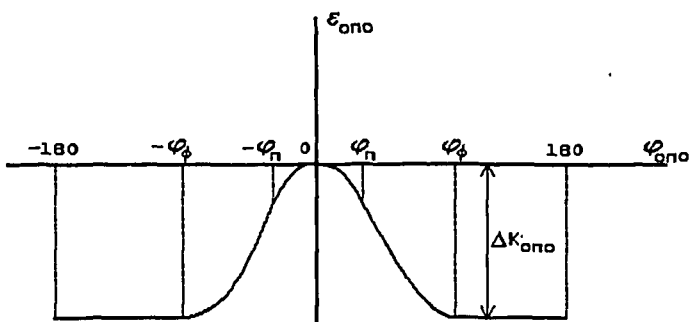


Рис. 1. Реактивность основного подвижного отражателя.
 $\epsilon_{\text{оп}o}$ - в абсолютных единицах, $\varphi_{\text{оп}o}$ - в градусах

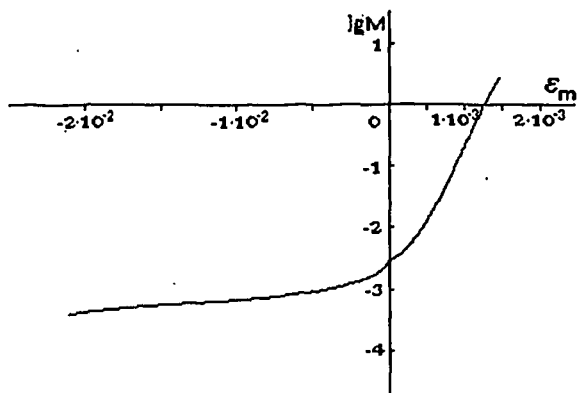


Рис. 2. Импульсный коэффициент передачи при базовых значениях $\Delta K, \tau, \beta$

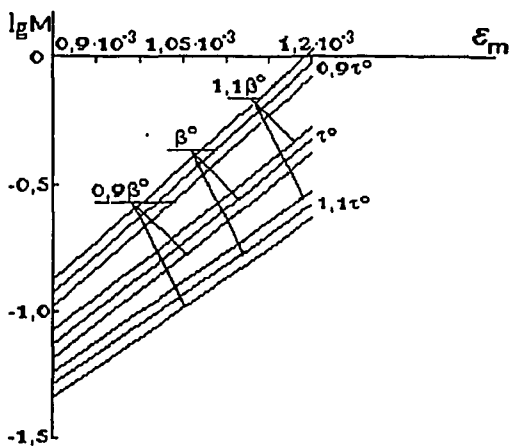


Рис. 3. Импульсный коэффициент при варьировании параметров τ и β .
 $\tau^\circ = 6 \cdot 10^{-8} \text{с}$, $\beta^\circ = 2,16 \cdot 10^{-3}$

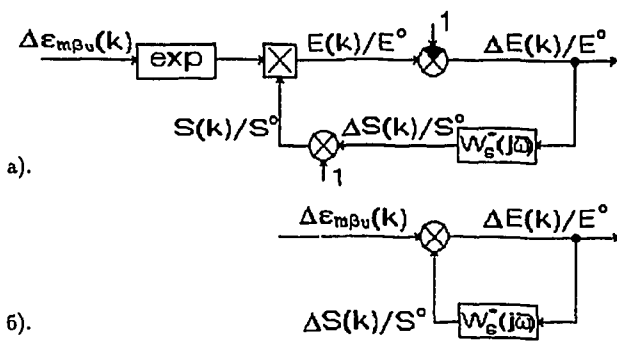


Рис. 4. Структурная схема импульсного реактора нулевой мощности:
 а) при экспоненциальной аппроксимации параметра M в уравнении (4),
 б) при линейризации уравнения (4)

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 β_c в качестве меры реактивности в импульсном реакторе.

4. Реактивность автоматического регулятора ИБР-2 в долях β_c 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.

Попов А.К.

P3-95-463

Импульсный коэффициент передачи реактора ИБР-2

Для реактора ИБР-2 проведены расчеты импульсного коэффициента передачи и влияния на него неизбежных ошибок при оценке основных параметров (времени жизни мгновенных нейтронов, доли запаздывающих нейтронов, крутизны пика импульса реактивности, эффективности основного подвижного отражателя). На основании вычислений подтверждена целесообразность измерения реактивности в импульсном реакторе в иных единицах, чем в стационарном реакторе. Дана оценка линеаризации импульсного коэффициента передачи и его логарифма.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1995

Перевод автора

Popov A.K.

P3-95-463

The IBR-2 Reactor Pulse Transfer Factor

The IBR-2 reactor pulse transfer factor is calculated by varying the basic parameters (prompt neutron life-time, delayed neutron fraction, the top parabolic coefficient and swing of the reactivity of the main moving reflector) because of inevitable errors in the estimates. The calculations confirmed that it is desirable to measure the pulse reactivity in units different from steady-state reactors. The linear approximations of the pulse transfer factor and its logarithm are estimated.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1995

Редактор Н.Я.Гребинник. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 10.01.96
Формат 60×90/16. Офсетная печать. Уч.-изд.листов 0,80
Тираж 325. Заказ 48786. Цена 480 р.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области