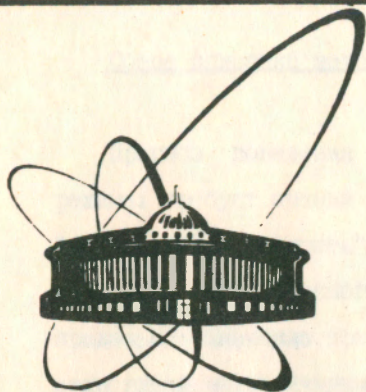


90-29



е
+

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

Ш 122

P3-90-29

Е.П.Шабалин, Н.П.Анцупов, В.Б.Злоказов,
В.Н.Мельников, Ю.Н.Пепельшев, А.К.Попов,
А.Д.Рогов

ИМПУЛЬСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В РЕАКТОРЕ ИБР-2

Направлено в журнал "Атомная энергия"

1990

Общее описание методики эксперимента

Прогноз поведения реактора в переходных и аварийных режимах требует знания временных характеристик обратной связи "мощность-реактивность". Это тем более важно для импульсного реактора периодического действия, где всегда существует предельное значение средней мощности, выше которого реактор становится неустойчивым [1,2]. Этот предел зависит от быстрых составляющих обратной связи. Эти соображения, а также тот факт, что при эксплуатации импульсного реактора ИБР-2 [3] была обнаружена тенденция к изменению мощностного эффекта реактивности с выгоранием, стимулировали эксперименты по измерению импульсной характеристики обратной связи, т.е. временной зависимости реактивности обратной связи в ответ на единичное изменение энерговыделения в одном импульсе мощности реактора.

В основу измерения импульсной характеристики был положен динамический метод осцилляции реактивности. На реактор, работающий в установившемся импульсном режиме с частотой 5 импульсов/сек, воздействовали периодически изменяющейся реактивностью негармонического вида (см. рис.1). Реактивность изменялась путем скачкообразного движения стержня автоматического регулирования с приводом от шагового двигателя (на время эксперимента система автоматического регулирования мощности отключалась). Специальный электронный блок, изготовленный в стандарте САМАС, управлял шаговым двигателем по заданному закону. Период и амплитуду модуляции устанавливал оператор. Движение стержня автоматического

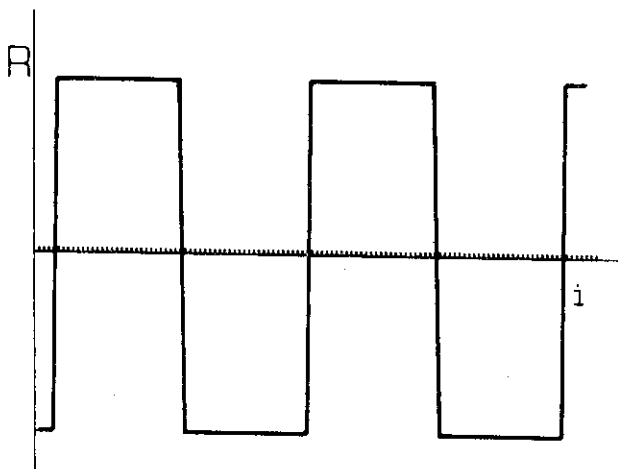


Рис. 1. Зависимость реактивности (R) от времени (i - порядковый номер импульса мощности) при периодической прямоугольной модуляции.

регулятора вверх и вниз происходило за время, меньшее промежутка между импульсами мощности (0,2 сек), что позволило точно смоделировать прямоугольную форму модуляции реактивности и, соответственно, точно знать введенную в любой момент реактивность.

Ранее характеристики обратной связи в реакторе ИБР-2 получали в опытах с однократным возмущением реактивности [4]. Но из-за больших флуктуаций энергии импульсов мощности (среднеквадратическое отклонение до 8%) этот метод позволял определить лишь мощностной коэффициент реактивности, а временные характеристики - только при условии описания обратной связи одним инерциальным звеном. Как будет ясно из дальнейшего, такая модель оказалась далеко не точной. При периодическом возмущении реактивности в реакторе устанавливаются детерминированные периодические колебания энергии импульсов мощности, на которые наложены

флуктуации. Значение энергии каждого импульса мощности регистрировалось в ЭВМ СМ I300.01, но запоминались только усредненные по многим периодам (до 2000) колебания, т.е. создавался массив значений Q_k , где

$$Q_k = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} Q_n}{N} ; \quad i=k+nM \text{--порядковый номер импульса,}$$

$k=1, \dots, M,$

N - число периодов модуляции за время набора,

M - число импульсов реактора в одном периоде (длина периода).

Усреднение позволило в значительной степени снизить влияние фоновых флуктуаций. Размах колебаний реактивности ($2\rho_a$) в экспериментах составлял $1,7 \cdot 10^{-5}$ $\Delta k/k$, а размах колебаний энергии импульсов мощности - до 20% от среднего значения. Периоды колебаний были в интервале от 0.4 сек ($M=2$) до 80 сек ($M=400$). После завершения набора полученные массивы обрабатывались на ПК "ПРАВЕЦ-16" по двум принципиально разным методикам.

Метод оценки импульсной характеристики как решение "обратной задачи"

В этом случае импульсную характеристику получают по одному массиву реализации, т.е. нужны экспериментальные данные только для одного периода модуляции (как можно более длинного). На первом этапе обработки вычисляют M значений суммарной реактивности (ρ_k) в периоде колебаний по известным отклонениям энергии импульса мощности от среднего значения

$$\left(\rho_k = \frac{Q_k - \bar{Q}_k}{\bar{Q}_k} \right) \text{ и параметрам запаздывающих нейтронов.}$$

Фактически это программа реактиметра, и, ввиду общеизвестности этого алгоритма, он здесь не описывается. Так как внешняя реактивность известна (задана положением стержня

автоматического регулятора), то в результате имеем реактивность обратной связи $\rho_{0,k} = \rho_k + \rho_d + \Delta\rho$, где $\Delta\rho$ - погрешность, обусловленная флуктуациями.

С другой стороны, из определения импульсной характеристики:

$$\rho_{0,k} = PT \sum_{l=1}^{\infty} k_l q_n, \quad (I)$$

где $k_l = k(1T)$ - значение импульсной характеристики для времени $t=1T$,

$T=0,2$ сек - период пульсации реактора ИБР-2,

P - средняя мощность реактора,

$n=(k-i+M) \bmod M$.

Так как импульсная характеристика при больших значениях t стремится к 0, то сумма в уравнении (I) является конечной, и коэффициенты k_l могут быть подобраны как решение "обратной задачи" - нахождение оператора по известным векторам. Подгонка производилась для импульсной характеристики следующего вида:

$$k(t) = \sum_{l=1}^L K_l e^{-\alpha_l t} + \sum_{d=1}^D a_d(t), \quad (2)$$

где $a_d(t) \begin{cases} a_d \neq 0, & \text{если } t=Td \\ a_d = 0, & \text{если } t \neq Td, \end{cases}$

при числе экспонент L от 1 до 4 и числе дискретных составляющих D от 0 до 26 (дискретные составляющие импульсной характеристики могут описать, например, чистое запаздывание экспонент).

При представлении импульсной характеристики в виде (2) соотношение (I) превращается в

$$\rho_{0,k} = PT \sum_{i=1}^M b_{i,k} q_i, \quad (3)$$

где $\rho_{0,k}$ и q_1 - экспериментальные значения (причем $\rho_{0,k}$ имеет определенную погрешность), а коэффициенты $b_{1,k}$ зависят известным образом от начальных параметров импульсной характеристики - амплитуд экспонент k_1 , их временных констант α_1 и дискретных составляющих a_d - всего $(2L+D)$ параметров. Подгонка значений этих параметров, наилучшим образом удовлетворяющая системе (3), проводилась по МНК с помощью пакета программ, специально созданного на языке ФОРТРАН-77, включающего как основу программу ROLSM [5] и реализованного на ПК "Правец-16".

В процессе отладки методики были найдены минимальные значения числа экспонент (L) и дискретных составляющих (D), которые дают наименьшее χ^2 : $L=3$ и $D=1-2$. Дальнейшее увеличение числа параметров не приводит к снижению χ^2 , а лишь увеличивает время работы программы, которое пропорционально $M^2(2L+D)$ и составляет 1-2 часа при $M=100$, $L=3$, $D=2$ (применение полученной импульсной характеристики к расчету динамических процессов в реакторе показало, что дискретные составляющие не оказывают заметного влияния на процесс, и потому на практике использовали чисто экспоненциальное приближение с тремя экспонентами, т.е. $L=3$, $D=0$).

Для достоверной подгонки необходимо, чтобы число уравнений в системе (3), т.е. значение периода модуляции M , было больше числа искомых параметров, т.е. $2L=6$. Однако этого недостаточно, т.к. параметры наиболее длинных экспонент (до 20сек) хорошо выявляются только при длинных периодах. Практически установлено, что M должно быть в пределах 70-100.

Метод передаточной функции

В этом случае для получения импульсной характеристики используют не один, а целый ряд экспериментальных массивов,

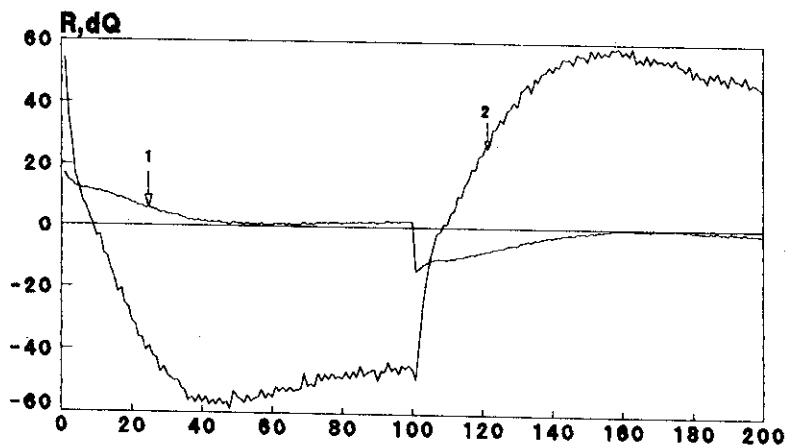
полученных для разных периодов модуляции — от $M=2$ до $M=400$ в одном и том же состоянии реактора (средней мощности и расхода теплоносителя). На основании этих данных вычисляют амплитудно-частотную характеристику реактора, из которой восстанавливают импульсную характеристику обратной связи в численном виде. Затем импульсная характеристика может быть аппроксимирована подходящим количеством экспонент.

Метод передаточной функции, по-видимому, имеет меньшую погрешность, но требует в несколько раз больше времени на проведение реакторного эксперимента.

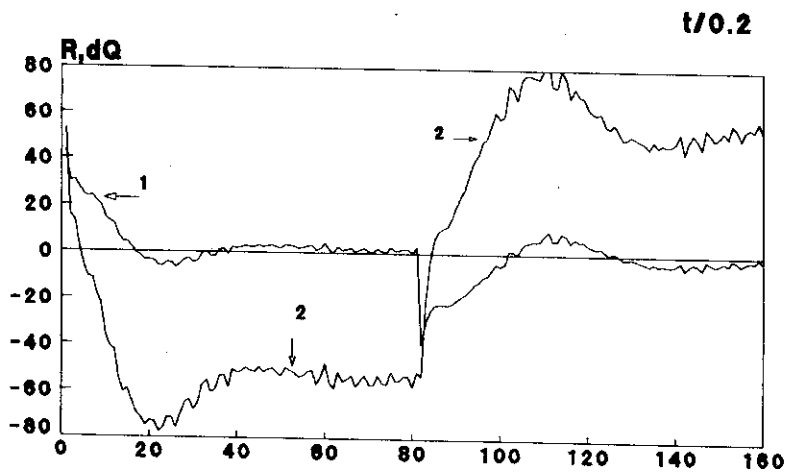
Результаты измерения

Опыты с периодической модуляцией реактивности для измерения временных характеристик обратной связи были проведены на реакторе ИБР-2 в течение 1988-1989г г. при среднем выгорании топлива PuO_2 1,0-1,5%. Средняя мощность варьировалась в интервале 0,2-2 МВт, расход натрия — от 50 до 90 м³/ час. На рис.2 приведены типичные экспериментальные данные, использованные для вычисления и. х.

Обработка экспериментальных данных по обеим методикам дала одинаковый результат (рис.3). Существенно, что обратная связь имеет сложный временной характер, для описания которого требуется не менее трех экспонент. Обнаружено, что параметры импульсной характеристики зависят как от мощности реактора, так и от расхода теплоносителя (натрия), см. рис.4 и табл. I. Обработка показала, что параметры трехэкспоненциальной модели импульсной характеристики взаимозависимы, поэтому погрешность их определения (которая демонстрируется в табл. I двумя наборами параметров, одинаково описывающими в пределах статистической погрешности одну и ту же импульсную характеристику для $P=2$ МВт) значительно выше, чем экспериментальная погрешность значений импульсной характеристики (см. рис.3).



а



б

$t/0.2$

Рис. 2. Измеренное отклонение энергии импульсов мощности от среднего значения (dQ - кДж, кривая 1) и вычисленная реактивность обратной связи (R - в единицах $10^{-3} \beta_{И}$, $\beta_{И} = 1.6 \cdot 10^{-4} \Delta k/k$, кривая 2) в течение одного периода модуляции.

t - порядковый номер импульса.

а - для средней мощности 0,8 МВт.

б - для средней мощности 2,0 МВт.

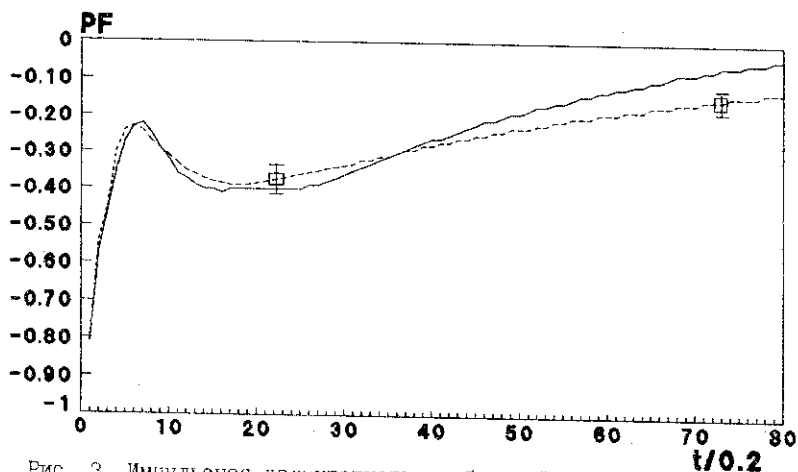


Рис. 3. Импульсная характеристика обратной связи в реакторе

ИБР-2, полученная по двум методикам:

— — метод передаточной функции;

--- метод обратной задачи;

PF — в единицах $\beta_{eff}/MДж$; время t — в сек.

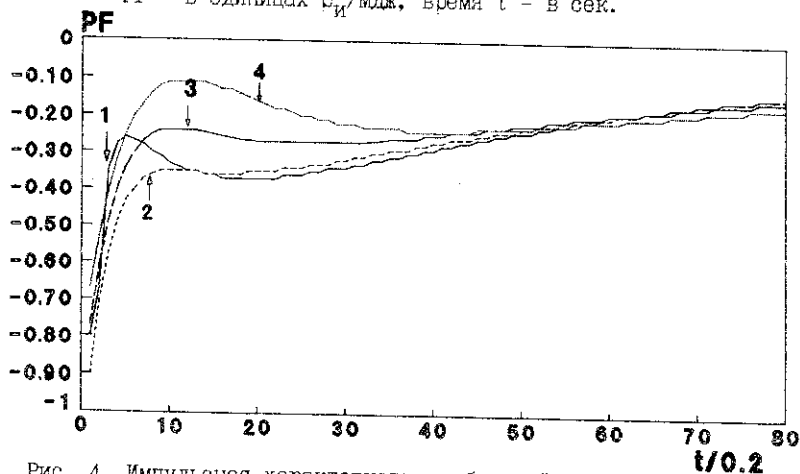


Рис. 4. Импульсная характеристика обратной связи в реакторе

ИБР-2 для мощности 2,0 МВт и расхода натрия через активную зону $90 \text{ м}^3/\text{час}$ (кривая 1) и для мощности 0,8 МВт и расходов 90, 70, $50 \text{ м}^3/\text{час}$ (соответственно кривые 2, 3 и 4);

PF — в единицах $\beta_{eff}/MДж$, время t — в сек.

Т а б л и ц а I

Параметры трехэкспоненциальной модели импульсной характеристики обратной связи в реакторе ИБР-2

Средняя мощность, МВт	Расход натрия, м ³ /час	K ₁ , β _u /МВт *)			I/α ₁ , с		
		-K ₁	K ₂	-K ₃	I/α ₁	I/α ₂	I/α ₃
2	90	0,65	0,6	1,7	10,2	1,8	0,3
		0,56	1,5	3,1	11,7	0,9	0,46
0,8	90	0,52	1,0	1,66	12,3	1,2	0,7
0,8	70	0,45	1,2	1,74	14,5	1,5	0,9
0,8	50	0,47	1,4	1,80	15,3	2,3	1,1

ПРИМЕЧАНИЕ: *) β_u = 1,6 * 10⁻⁴ ΔK/K - единица измерения реактивности в импульсном реакторе.

Несколько слов о физической природе обратной связи в ИБР-2. Бесспорно, и это подтверждается теоретическими оценками, что резкий подъем импульсной характеристики в интервале 0,2-0,5 сек отражает изменение температуры топливного сердечника при нестационарном переносе тепла к оболочке твэла и натрия, а выбег импульсной характеристики в интервале 0,5-3 сек связан с положительным эффектом реактивности по температуре натрия в активной зоне [3]. Непонятен колебательный характер этого выбега (обычно слабо проявляющийся). Колебания более заметны при низких значениях расхода натрия, что видно на импульсной характеристике, полученной в результате обработки динамического процесса при однократном возмущении реактивности в 1983 г., рис.5.

Учитывая характер полученных результатов, безусловно, следовало бы провести дополнительный анализ устойчивости ИБР-2 и динамических процессов в аварийных ситуациях. Однако

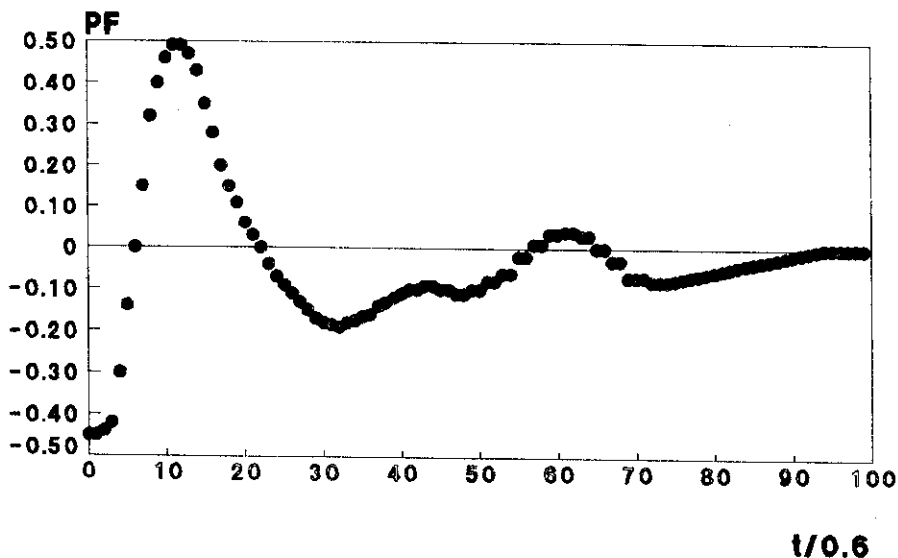


Рис. 5. Импульсная характеристика обратной связи в реакторе ИБР-2 при расходе $26 \text{ м}^3/\text{час}$ (мощность 100-200 кВт).

достоверный анализ будет лишь при наличии общей эмпирической модели обратной связи, справедливой в широком диапазоне мощности реактора и расхода натрия. Для этого нужны дополнительные измерения импульсной характеристики при промежуточных значениях мощности и расхода (относительно данных табл. I).

Авторы статьи признательны персоналу реактора ИБР-2 за участие в проведении экспериментов.

Литература

- И. В. П. Шабалин. О колебаниях мощности и пределе устойчивости импульсного реактора. - Атомная энергия, т. 61, вып. 6, с. 401-406, 1986.

2. А.К. Попов. Передаточная функция и устойчивость импульсного реактора периодического действия. - Атомная энергия, т.62, вып.3, с.195-197, 1987.
3. В.Д. Ананьев, В.А. Архипов, А.И. Бабаев и др. Энергетический пуск реактора ИБР-2 и первые физические исследования на его лучках. - Атомная энергия, т.57, вып.4, стр.227-234, 1984.
4. Ю.Н. Пепельшев, А.К. Попов, А.Д. Рогов. Частотные характеристики быстрой мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2. - Сообщение ОИЯИ, Р13-83-471, 1983.
5. В.Б. Злоказов. ROLSM - программа для робастной минимизации квадратичного функционала, нелинейно зависящего от параметров. - Сообщение ОИЯИ, Р10-86-618, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 января 1990 года.