

P13-2012-131

Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов, Ц. Цогтсайхан

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ ЭНЕРГИИ
ИМПУЛЬСОВ РЕАКТОРА ИБР-2М**

Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д., Цогтсайхан Ц.
Статистический анализ флуктуаций энергии импульсов
реактора ИБР-2М

P13-2012-131

В работе приведены основные результаты статистического анализа флуктуаций энергии импульсов за полный цикл работы реактора ИБР-2М длительностью 11 сут. Получены данные о динамике изменения шумового состояния реактора за цикл. Представлены диапазоны частот, уровень колебаний, указаны возможные причины появления колебаний в шумах энергии импульсов. Отмечен несимметричный характер распределения энергии импульсов, обусловленный нелинейным поведением быстрой мощностной обратной связи. Показано, что 4 % среднеквадратических колебаний мощности из полных 6 % вызваны вибрациями лопастей подвижных отражателей. Низкий уровень колебаний энергии импульсов и стабильность спектрального состава колебаний подтверждают надежность и безопасность работы реактора на номинальной мощности 2 МВт.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2012

Pepelyshev Yu. N., Rogov A. D., Tsogtsaikhan Ts.
Statistical Analysis for the Pulse Energy Fluctuations
of the IBR-2M Reactor

P13-2012-131

We present main results of the statistical analysis for the pulse energy fluctuations at the full cycle of the IBR-2M reactor. The data on the dynamics of the noise state of the reactor in the cycle are obtained. The frequency ranges, level of the fluctuations and the possible causes of the fluctuations in the noise energy pulses are presented. Asymmetrical distribution of energy pulses and non-linear behavior due to fast power feedback have been observed. It is shown that 4% of the mean square power fluctuations of the full 6% are due to vibrations of blades of the movable reflectors. The low level of pulse energy fluctuations and stability of their spectral components confirm the reliability and reactor safety at the average power 2 MW.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Импульсный реактор ИБР-2М, пущенный в эксплуатацию в 2012 г., есть модернизированная версия реактора ИБР-2, остановленного в 2006 г. в связи с выработкой ресурса. Особенностью реактора типа ИБР-2 является высокая чувствительность к флуктуациям реактивности, в 40 раз выше, чем, например, у реактора стационарного типа с урановым топливом. Случайные колебания реактивности ИБР-2М на мощности вызваны работой различных технологических систем, обеспечивающих нормальное функционирование реактора (системы охлаждения активной зоны, вращающегося модулятора реактивности и т. д.), а также изменением динамических свойств реактора в процессе эксплуатации. Колебания реактивности неизбежны и в сочетании с высокой чувствительностью реактора вызывают высокий уровень шумов энергии импульсов. Анализ шумов мощности ИБР-2М позволяет определять различные изменения и нарушения в работе реактора и диагностировать измененное (нетипичное) состояние реактора на ранней стадии развития дефекта. Исследование шумов на протяжении полного реакторного цикла имеет большое значение для определения условий безопасной и надежной работы реактора. Для этой цели была создана система измерения реакторных параметров с возможностью регистрации больших массивов данных в течение всего реакторного цикла (10–14 сут). В работе представлены некоторые особенности статистического анализа данных по шумам мощности ИБР-2М и приведены экспериментальные результаты.

1. МЕТОДИКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Обработка данных основывалась на статистическом анализе временных рядов. Исходный временной ряд представляет собой массив последовательных значений энергии импульсов, зарегистрированных в течение полного реакторного цикла длительностью до 20 сут. Длина временного ряда в практических измерениях может составлять до $\sim 5 \cdot 10^7$ значений. Данные об энергии импульсов регистрировались с помощью штатных детекторов нейтронов, расположенных вокруг активной зоны (АЗ) (борных ионизационных камер в токовом режиме, см. рис. 1). Накопление данных осуществлялось с помощью

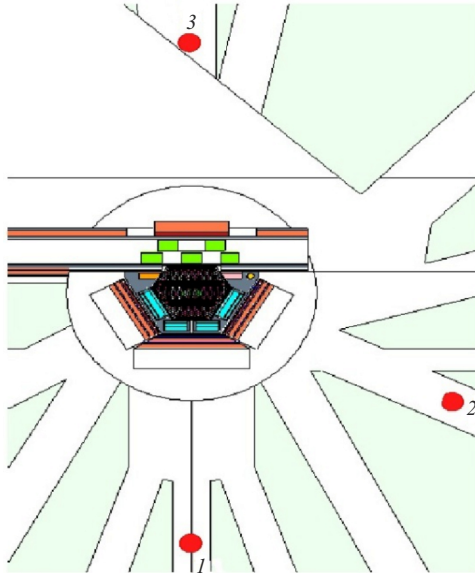


Рис. 1. Расположение камер контроля мощности: 1 — 5-й пучок, 115,3 см от центра АЗ; 2 — 8-й пучок, 119,2 см от центра АЗ; 3 — 13-й пучок, 116,7 см от центра АЗ

системы измерения реакторных параметров, предназначенной для исследования реактора на стадии физического и энергетического пуска. Результаты измерений записывались с частотой повторения импульсов, равной 5 с^{-1} , меткой астрономического времени.

Полный временной ряд $X(t)$, зарегистрированный в течение всего реакторного цикла, разбивается на N отдельных последовательных временных рядов X_i длиной 8192. Далее для каждого временного ряда X_i проводится предварительная обработка, суть которой заключается в следующем. В начале осуществляется фильтрация временного ряда для исключения неподобных значений, вызванных различными возможными сбоями измерительной системы или искажениями в канале передачи данных (аппаратурных выбросов), затем проводятся операции удаления полиномиального тренда и центрирование. Наличие выброса в точке i X_i определялось по критерию [1]

$$\frac{|X_i - \bar{X}|}{\sigma_X} \geq k, \quad (\sigma_L^2 - \sigma_X^2) / \sigma_X^2 \geq m,$$

где \bar{X} — среднее значение временного ряда, $L = \overline{116}$ — число разбиений временного ряда X_i по 512 значений, $i = \overline{1, 512}$ — текущий индекс, σ_X, σ_L — стандартное отклонение, определенное по всему ряду X_i и на участке временного ряда (L -м сегменте) длиной 512. Значения k и m зависят от плотности

распределения и для исследуемых временных рядов выбирались равными 6. При малом числе выбросов (менее 10) значение выброса в точке i заменялось на $(X_{i-1} + X_{i+1})/2$. При несоблюдении условий стационарности в широком смысле временной ряд приводился к стационарному виду с потерей части информации в низкочастотной области спектра. Для последовательных сегментов временного ряда длиной 512 устранялся линейный $Y_t = a + bx$ или квадратичный $Y_t = a + bx + cx^2$ тренд. Коэффициенты a, b и c определялись методом наименьших квадратов. В дальнейшем исследовался центрированный временной ряд:

$$X(t) = X(t) - Y_t.$$

В общей статистической обработке колебаний энергии импульсов учитывалось то обстоятельство, что данные об энергии импульсов поступают с трех независимых детекторов, окружающих активную зону. Их показания могут коррелировать с движением корпуса активной зоны как целого, и с движением отдельных элементов, окружающих активную зону. Кроме того, известно, что на колебания мощности влияет целый ряд реакторных параметров, возмущения которых вызывают колебания реактивности и соответственно колебания энергии импульсов. Поэтому в статистическую обработку были включены также и процедуры взаимного спектрального и корреляционного анализа. Вычислялись следующие характеристики временного ряда:

- 1) плотности распределения энергии импульсов $P(X_n)$ и отклонений $P(\Delta X_n)$, $\Delta X_n = X_{n+1} - X_n$, параметры распределения — первые четыре центральных момента (среднее значение, дисперсия, коэффициент асимметрии и эксцесс);
- 2) автоспектр (спектральная плотность мощности) $S_{XX}(f)$, f — частота;
- 3) плотность кросс-спектра (взаимная плотность мощности) $S_{XY}(f)$;
- 4) вариация (автовариационная функция) $R_{XX}(\tau)$, τ — временной сдвиг;
- 5) ковариация (взаимная автоковариационная функция) $R_{XY}(\tau)$;
- 6) фазовый сдвиг;
- 7) функция когерентности;
- 8) вычисление спектральных оценок.

2. ВЫЧИСЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОЦЕНОК

В результате эксперимента в памяти ЭВМ формируется конечный дискретный временной ряд

$$X(n\Delta t) = X^*(n\Delta t) \cdot f_t(n\Delta t), \quad (1)$$

где $n = 0, \dots, T-1$, T — длина ряда (число последовательных значений энергии импульсов), Δt — период между импульсами, $X^*(n\Delta t)$ — бесконечный временной ряд, соответствующий реальному физическому процессу,

$f_t(n\Delta t)$ — прямоугольное весовое окно данных. Непосредственный переход от временных соотношений, определяемых выражением (1), к частотным

$$F_x(k\Delta f) = F_x^*(k\Delta f) * F(k\Delta f), \quad (2)$$

где $\Delta f = f_0/2T$; $-\infty < k < \infty$; f_0 — частота опроса; F — оператор фурье-преобразования; значком $*$ обозначен оператор свертки, приводит к искаженному представлению спектральной оценки, в которой компоненты временного ряда с частотой, не кратной величине $1/T$, оказываются «размытыми» по всем возможным частотам вычисленного спектра. Для повышения статистической устойчивости авто- и кросс-спектров использовались следующие методы:

- 1) введение временного окна;
- 2) применение метода периодограмм с усреднением.

Основу метода периодограмм в данном пакете обработки составляет усреднение спектральных оценок, получаемых на коротких участках (сегментах) исходного временного ряда $X(n\Delta t)$, $n = 0, 1, \dots, T-1$. Ряд $X(n\Delta t)$ разбивается на L участков длиной $M = 512$. Для каждого i -го сегмента $X^{(i)}$ вычисляется конечное дискретное преобразование Фурье $S^{(i)}(f)$, на основе которого определяются текущие i -е периодограммы

$$|S^{(i)}(f)|^2 = \text{Re}^2[S^{(i)}(f)] + \text{Im}^2[S^{(i)}(f)];$$

Оценкой авто (\overline{S}_{XX})- и кросс-спектров (\overline{S}_{XY}) являются оценки усредненных периодограмм

$$\overline{S}_{XX}(f) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L |S_{XX}^{(i)}(f)|^2; \quad \overline{S}_{XY}(f) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L |S_{XY}^{(i)}(f)|^2;$$

Оценки фазового спектра $\Phi_{XY}(f)$ и функция когерентности $\gamma_{XY}^2(f)$ задаются в виде

$$\Phi_{XY}(f) = \text{arctg} \frac{\text{Im}[S_{XY}]}{\text{Re}[S_{XY}]}, \quad \gamma_{XY}^2(f) = \frac{\overline{S}_{XY}^2}{S_{XX} S_{YY}},$$

а вариация R_{XX} и ковариация R_{XY} вычисляются из обратного дискретного преобразования Фурье.

$$R_{XX}(\tau) = F^{-1}(S_{XX}), \quad R_{XY}(\tau) = F^{-1}(S_{XY}),$$

где τ — временной сдвиг.

Метод модифицированных периодограмм позволяет в \sqrt{L} уменьшить стандартную ошибку спектральных оценок, сохранив при этом высокую разрешающую способность, свойственную отдельной периодограмме. В начале обработки по методу периодограмм вводится дополнительное усреднение каждой

периодограммы в соответствии с выбранным спектральным окном, что эквивалентно умножению отдельного i -го сегмента временного ряда на соответствующее временное окно. В работе использовалось одно из оптимальных временных окон — окно Кайзера–Бесселя [2].

Для оценки статистического разброса энергии импульсов использовались следующие характеристики:

1. Дисперсия

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2,$$

где X_i — временной ряд, \bar{X} — среднее значение, n — длина временного ряда. Дисперсия по спектру

$$\sigma_f^2 = \sum_{j=1}^z |S^{(i)}(f)|^2 \Delta f,$$

где $|S^{(i)}(f)|^2$ — спектральная плотность; $z = 256$ — число дискретных значений спектральной плотности; f — частота. При введении временного окна условие равенства дисперсий по времени и спектру не выполняется, т. е. $\sigma_t^2 \neq \sigma_f^2$, а коэффициент связи между ними при устранении тренда и переходе от одного временного ряда к другому может меняться. Поэтому использовались обе оценки дисперсии.

2. Относительное стандартное отклонение σ_Q/\bar{Q} и относительный размах колебаний

$$\Delta Q_m/\bar{Q}, \Delta Q_m = Q_{\max} - Q_{\min},$$

где Q_{\max} , Q_{\min} — максимальное и минимальное значение энергии импульсов.

3. Относительная парциальная дисперсия

$$\eta_j^2 = \left(\frac{\sigma_{f_j}^2}{\sigma_f^2} \right) \cdot 100 \%,$$

где $\sigma_{f_j}^2$ — дисперсия колебаний на средней частоте f_j в диапазоне Δf_j

$$\sigma_{f_j}^2 = \sum_{\Delta f_j} |S^{(i)}(f)|^2 \Delta f,$$

и относительное парциальное среднеквадратическое отклонение

$$\eta_j = \left(\sqrt{\frac{\sigma_{f_j}^2}{\sigma_f^2}} \right) \cdot \frac{\sigma_t}{\bar{Q}} \cdot 100 \%.$$

Оценки парциальных среднеквадратических отклонений на частоте f_j введены с целью показать, какие были бы колебания мощности, если бы другие источники возмущений кроме j -го отсутствовали.

4. Коэффициент асимметрии $A = \frac{\mu^3}{\sigma_t^3}$, где $\mu^3 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{n-1}$, и эксцесс $E = \frac{\mu^4}{\sigma_t^4} - 3$, где $\mu^4 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{n-1}$. Для симметричных распределений коэффициент асимметрии равен нулю. Эксцесс характеризует относительную остроконечность или сглаженность распределения по сравнению с нормальным, для которого эксцесс равен нулю.

3. ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В качестве исходного временного ряда использовались $4,75 \cdot 10^6$ последовательных значений энергии импульсов, каждое из которых представляло собой усредненное по трем независимым измерительным каналам значение (см. рис. 1). Такая длина временного ряда соответствовала 11 сут. непрерывной работы реактора на средней мощности 2 МВт. Усредненная по всему реакторному циклу плотность распределения энергии импульсов приведена на рис. 2. В табл. 1 представлены значения параметров этого распределения.

Как видно из рис. 2 и табл. 1, распределение энергии импульсов несимметрично: оно смещено в сторону меньших значений энергий. При этом нужно отметить, что вероятность появления импульсов в группе самых больших

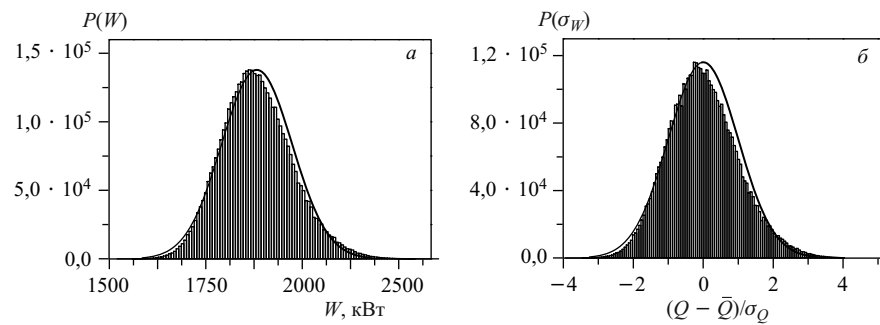


Рис. 2. Плотность распределения импульсов (P) на мощности 2 МВт при расходе натрия через активную зону $90 \text{ м}^3/\text{ч}$: a — по мощности за период следования импульсов, b — в долях стандартного отклонения энергии импульсов. Линией показан результат аппроксимации по Гауссу

Таблица 1. Значения параметров плотности распределения флуктуаций энергии импульсов на мощности 2 МВт и расходе натрия через активную зону 90 м³/ч

Название параметра	Распределение по мощности, кВт	Распределение по относительному отклонению энергии импульсов, $(Q - \bar{Q})/\sigma_t$
Среднее значение	1960	0
Стандартное отклонение	110	1
Максимальное отклонение от среднего в большую сторону	560 (28 %)	5,2
Максимальное отклонение от среднего в меньшую сторону	-430 (22 %)	-3,9
Относительный размах	990 (50 %)	9,1
Коэффициент асимметрии		0,34
Эксцесс		0,19

энергий выше, чем импульсов с самыми малыми энергиями. Согласно данным табл. 1, отклонение значения максимальной энергии импульса от среднего в 1,33 раза выше, чем отклонение импульса с минимальной энергией. Полный размах колебаний мощности, равный $9,1 \sigma_t$, значительно превышает размах нормального усеченного распределения ($\sim 6 \sigma_t$). Здесь и далее в тексте понятия распределение энергии и распределение мощности эквивалентны, поскольку при постоянной и стабильной длительности вспышки соотношение между энергией вспышки и фона не меняется, и мощность есть просто энергия за период. Среднеквадратические отклонения колебаний мощности в среднем составляют 110 кВт или 5,5 % от средней мощности, что мало. Напротив, размах колебаний мощности относительно среднего значения за полный цикл работы реактора достаточно велик (50 %), хотя и находится в пределах допустимых требований. Для оценки степени безопасности реактора ИБР-2М важны не только характеристики разброса энергии импульсов, но и параметры распределения так называемых быстрых отклонений энергии импульсов, т. е. отклонений энергии в соседних импульсах (от i -го до $i + 1$ импульса). На рис. 3 представлена плотность распределения быстрых отклонений энергии, в табл. 2 — параметры этого распределения.

Характерно, что асимметрия распределения быстрых колебаний мощности (см. рис. 3) значительно меньше асимметрии в распределении импульсов по энергии. В пределах погрешности измерений и обработки данных можно считать, что максимальные быстрые отклонения мощности в сторону ее уменьшения и увеличения в среднем равны между собой и составляют ± 800 кВт. Это говорит о том, что в отдельных редких случаях энергия импульса может скачком меняться практически от минимального до мак-

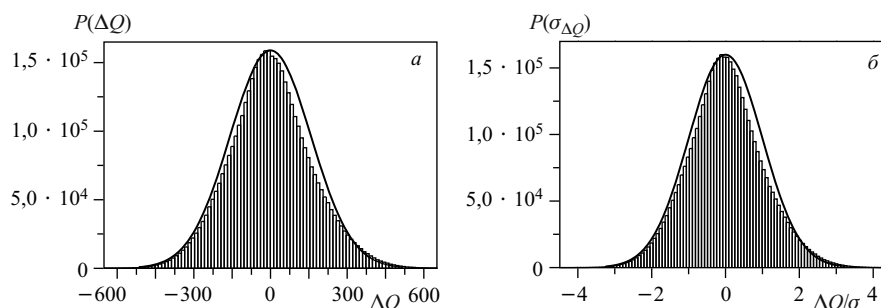


Рис. 3. Плотность распределения быстрых отклонений энергии импульсов на средней мощности 2 МВт и при расходе натрия через активную зону $90 \text{ м}^3/\text{ч}$: *a* — по мощности (ΔQ , кВт), *б* — в долях стандартного отклонения. Линией показан результат аппроксимации по Гауссу

Таблица 2. Значения параметров плотности распределения быстрых колебаний энергии импульсов на мощности 2 МВт при расходе натрия через активную зону $90 \text{ м}^3/\text{ч}$

Название параметра	Распределение по мощности ΔQ , кВт	Распределение по относительному отклонению энергии импульсов, $\Delta Q/\sigma$
Среднее значение	0	
Стандартное отклонение	158	1
Максимальное отклонение в большую сторону	814 (40 %)	5,1
Максимальное отклонение в меньшую сторону	-776 (39)	-4,9
Коэффициент асимметрии	0,14	
Экссесс	0,23	

симального значения. Для быстрых отклонений до 170 кВт преобладают отклонения в сторону меньших значений мощности. Асимметрия в распределении импульсов по энергии обусловлена нелинейным характером быстрой мощностной обратной связи. Последняя в ИБР-2М такова, что при одном и том же быстром возмущении реактивности изменение мощности в сторону уменьшения будет меньше, чем в сторону увеличения. Установление физических причин быстрой мощностной обратной связи есть чрезвычайно сложная задача, которая требует отдельного изучения и здесь не рассматривается. Отметим только, что все многообразие быстрых эффектов обратной связи вызвано температурными изменениями в активной зоне при изменении мощности.

Спектральный состав колебаний энергии импульсов показан на рис.4, где приведена усредненная за цикл спектральная плотность колебаний энергии импульсов. Из рис. 4 видно, что в спектре колебаний энергии импульсов имеются два больших пика на частотах 0,82 и 1,78 Гц и три пика меньшей интенсивности в диапазоне частот 0,92–1,63 Гц. Как показал взаимный спектральный анализ, указанные пики есть детерминированные (гармонического типа) колебания мощности, обусловленные осевыми вибрациями лопастей подвижных отражателей [3]. Частотный состав детерминированных колебаний энергии импульсов представлен в табл.3. Отметим, что указанные частоты есть частоты реальных колебаний, «замаскированных» в спектре колебаний мощности в частотном диапазоне ниже критической частоты Найквиста, равной для ИБР-2М 2,5 Гц.

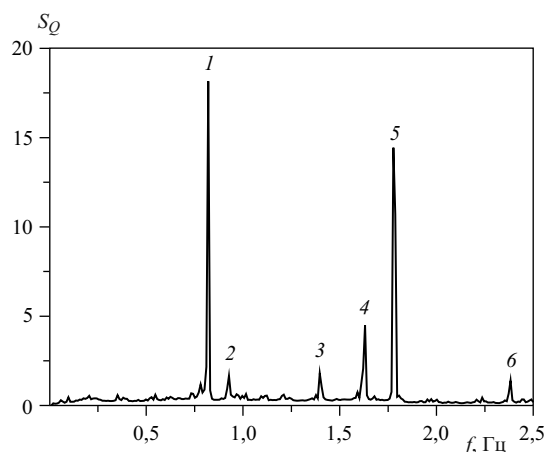


Рис. 4. Усредненная за цикл спектральная плотность колебаний энергии импульсов ИБР-2М (S_Q) при мощности 2 МВт, f — частота. Цифрами отмечены пики на частотах: 1 — 0,82, 2 — 0,93, 3 — 1,40, 4 — 1,63, 5 — 1,78 и 6 — 2,38 Гц

Таблица 3. Сравнительная интенсивность колебаний энергии импульсов на основных детерминированных частотах

№ пика	f , Гц	S_Q	Источник возмущений
1	0,82	18,19	Осевые колебания подвижных отражателей
2	0,93	1,74	
3	1,40	1,84	
4	1,63	4,55	
5	1,78	14,5	
6	2,38	1,43	

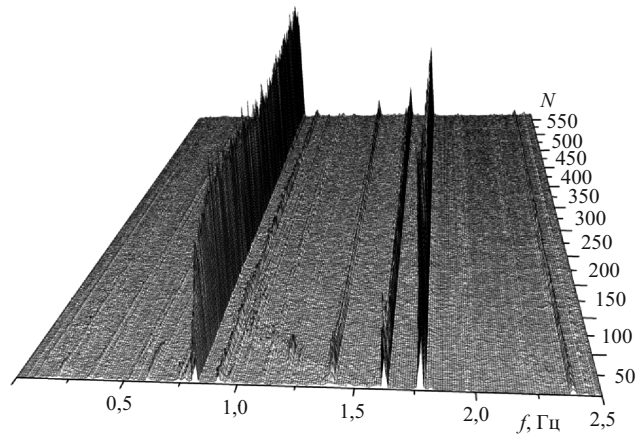


Рис. 5. Изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М за цикл длительностью 11 сут. Представлены 565 спектров

Изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М за цикл от момента выхода на мощность 2 МВт приведено на рис. 5. В процессе работы реактора, как видно из рис. 5, спектральная плотность колебаний энергии импульсов слабо меняется во времени, что в целом говорит о достаточно стабильной работе реактора и модулятора реактивности. Изменение величины относительной парциальной дисперсии колебаний энергии импульсов, обусловленных вибрациями лопастей подвижных отражателей за полный 11-сут реакторный цикл, представлено на рис. 6. Там же приведено изменение величины среднеквадратических отклонений флуктуа-

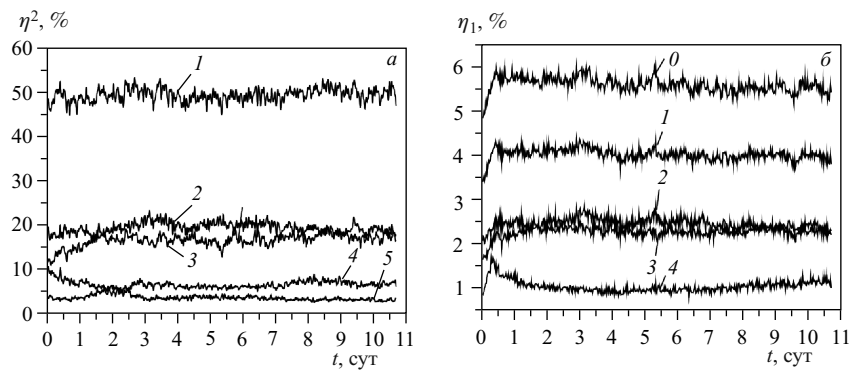


Рис. 6. Изменение величины относительной парциальной дисперсии (а) и относительного среднеквадратического отклонения (б) колебаний энергии импульсов на основных частотах: 0 — полные колебания; 1 — на частотах, связанных с вибрациями лопастей подвижных отражателей; 2 — 0,82; 3 — 1,78; 4 — 1,40; 5 — 1,63 Гц

ций энергии импульсов. Переходная область роста колебаний, наблюдаемая в спектрах на всех основных частотах после выхода реактора на мощность (см. рис. 5 и 6), связана с прогревом лопастей подвижных отражателей. Усиление колебаний мощности в начале цикла на наиболее интенсивной частоте 0,82 Гц, как показал анализ, вызвано ростом осевых (по направлению к активной зоне) колебаний лопасти дополнительного подвижного отражателя. Через 10 ч работы реактора на мощности уровень детерминированных колебаний стабилизируется, и далее их интенсивность слабо меняется во времени.

Две основные частоты колебаний, возбуждаемые в мощности со стороны модулятора реактивности 0,82 и 1,78 Гц, дают в среднем по 20 % от полной дисперсии шумов. Суммарная дисперсия колебаний мощности на шести детерминированных частотах (см. табл. 2) составляет 50 % от полной дисперсии. Таким образом, основной вклад, 50 % в дисперсию шумов мощности вносят неконтролируемые вибрации подвижных отражателей, и этот вклад в среднем сохраняется в течение всего реакторного цикла.

ВЫВОДЫ

Создана программа для статистической обработки временных рядов большой длительности до $\sim 5 \cdot 10^7$ последовательных событий, с помощью которой получены данные о шумовом состоянии реактора на стадии его начальной эксплуатации в 2011 г. Показано, что спектральный состав колебаний энергии импульсов реактора на 50 % обусловлен детерминированными (гармонического типа) колебаниями подвижных отражателей и что интенсивность колебаний слабо меняется в течение реакторного цикла длительностью 11 сут. Полные относительные стандартные отклонения колебаний мощности за цикл не превышают 6 %, из которых 4 % связаны с колебаниями подвижных отражателей. Низкий уровень колебаний энергии импульсов, их спектральный состав и стабильность во времени подтверждают надежность, стабильность и безопасность работы реактора на номинальной мощности 2 МВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д. Спектральный анализ статистических параметров импульсного реактора ИБР-2 (методика обработки). ОИЯИ, Р13-84-73. Дубна, 1984.
2. Хэррис Ф. Дж. // ТИИЭР. 1978. Т. 66. С. 60.
3. Ананьев В. Д. и др. Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). ОИЯИ, Р13-2012-42. Дубна, 2012.

Получено 11 декабря 2012 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 24.01.2013.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,91. Тираж 245 экз. Заказ № 57897.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/