

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

П259

13-87-565

Ю. Н. Пепёлышев

**О ВОЗМОЖНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ
АНОМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ РЕАКТОРА ИБР-2
ПО ШУМАМ МОЩНОСТИ**

1987

← Важным элементом безопасности ядерного реактора является организация диагностики его текущего состояния и получение некоторого прогноза, позволяющего предотвратить аварийные ситуации и устранить дефекты на ранней стадии их развития. Задача диагностики обычно затруднена тем, что между параметрами, определяющими функционирование реактора /например, между температурой теплоносителя и его расходом, мощностью и т.д./, существуют сложные перекрестные связи, а природа причинно-следственных связей, приводящих к недопустимому изменению отдельных параметров, во многих случаях заранее неизвестна. В этой ситуации наиболее полное представление о состоянии реактора можно получить, например, из анализа его шумов. Цель данной работы состояла в том, чтобы на конкретном примере показать, что для реактора ИБР-2 анализ шумов энергии импульсов мощности позволяет: во-первых, идентифицировать аномальные состояния реактора и, во-вторых, использовать корреляцию между вибрациями подвижных отражателей /ПО/ и реакторным шумом для раннего обнаружения дефектов в системе ПО.

В качестве конкретного примера анализируется ситуация, когда развитие одного скрытого дефекта в системе ПО привело к временной остановке реактора.

1. СЛУЧАЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ РЕАКТИВНОСТИ РЕАКТОРА ИБР-2

Шумы мощности реактора ИБР-2 содержат информацию практически о всех случайных эффектах реактивности, связанных с работой основных технологических систем. При нормальной работе реактора каждый из эффектов в среднем вносит вполне определенный вклад в реакторный шум. Например, при частоте следования импульсов мощности 5 1/с основным источником неконтролируемых флуктуаций мощности являются поперечные вибрации ПО /52-58%, на частотах 0,8 и 1,63 Гц/. Низкочастотный компонент реакторного шума / $0 \leq f \leq 0,8$ Гц/ практически полностью обусловлен протеканием натрия через активную зону /17-21%. Наличие корреляции между поперечными колебаниями ПО(X) и флуктуациями энергии импульсов мощности (Q) позволяет использовать ее для идентификации нарушений в работе ПО, а изменения в низкочас-

точной части спектра реакторных шумов S_Q - для идентификации нарушений в системе охлаждения реактора.

При малых отклонениях энергии импульсов мощности от среднего значения \bar{Q} выделим следующие эффекты реактивности: полные $\sigma\epsilon = \frac{\sigma_Q}{\bar{Q}} \beta_u$, где σ_Q - стандартное отклонение энергии импульсов мощности; $\beta_u = 1,6 \cdot 10^{-4}$ (в режиме 5 1/с) - импульсная доля запаздывающих нейтронов, и парциальные $\sigma\epsilon_i = (\sigma_Q / \bar{Q}) \beta_u \eta_i$;

где $\eta_i^2 = \int_{\Delta f_i} S_Q(f) df / \sigma_Q^2$ - доля дисперсии мощности, коррелирующая с i -м источником шумов; $i = \text{ПО}$, натрий; Δf_i - частотная область корреляции $Q - i$. Области Δf_i , характерные для вибраций ПО и для натриевых эффектов, практически не перекрываются: $\Delta f_{\text{Na}} = (-0 \div 0,79)$ Гц, $f'_{\text{по}} = 0,8 \pm \Delta f_x / 2$ и $f''_{\text{по}} = 1,63 \pm \Delta f_x / 2$; $\Delta f_x = 0,03$ Гц.

При непосредственном измерении случайных отклонений лопастей ПО выделим следующую оценку колебаний внешней реактивности:

$$\sigma\epsilon_{\text{по}}^* = \left[\sum_{\ell} \left(\frac{dK}{dX} \sigma_x \right)_{\ell}^2 + 2K_x \prod_{\ell} \left(\frac{dK}{dX} \sigma_x \right)_{\ell} \right]^{1/2}$$

где $\frac{dK}{dX}$ - изменение реактивности при осевом сдвиге отражателей ($dK/dX|_{\text{опо}} = 4 \cdot 10^{-4}$ 1/мм, $dK/dX|_{\text{дпо}} = 1 \cdot 10^{-4}$ 1/мм); σ_x - стандартное отклонение поперечных колебаний ОПО или ДПО; $\ell = \text{ОПО}$, ДПО; K_x - коэффициент корреляции между колебаниями ОПО и ДПО. Величины $\sigma\epsilon$, $\sigma\epsilon_{\text{по}}$, $\sigma\epsilon_{\text{Na}}$ и $\sigma\epsilon_{\text{по}}^*$ определяются независимо, но в одном цикле измерений. Коэффициент K_x вычисляется на основе данных о взаимной спектральной плотности и фазовом сдвиге колебаний отдельных отражателей.

При малой мощности ($W \leq 100$ кВт) справедливо условие $\sigma\epsilon_{\text{по}} = A \sigma\epsilon_{\text{по}}^*$; которое используется для дополнительной калибровки показаний датчиков осевых отклонений отражателей в единицах реактивности $A = 0,77$. Кроме того, расчетным путем по измеренной величине $\sigma\epsilon_{\text{по}}^*$ можно оценить $\sigma\epsilon_{\text{пор}}$ / индекс "р" указывает на расчетную оценку $\sigma\epsilon_{\text{по}} / \sigma\epsilon_{\text{пор}} = H \sigma\epsilon_{\text{по}}^*$, где H - модуль передаточной функции реактора, зависящий от частоты и уровня средней мощности.

Значение H определяется исходя из расчетной модели, предложенной в работе [1].

Ниже приводится анализ случайных эффектов реактивности, зарегистрированных при первом выводе реактора с мощности 1 МВт на мощность 2 МВт.

2. ДИНАМИКА СЛУЧАЙНЫХ ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ ПРИ ПЕРВОМ ВЫВОДЕ РЕАКТОРА НА МОЩНОСТЬ 2 МВТ

Основные данные об уровне флуктуаций мощности и поперечных вибраций ПО на различных этапах подъема мощности приведены в таблице. Средние значения измеренной и расчетной величин случайных колебаний реактивности в зависимости от времени непрерывной работы ПО представлены на рис.1.

Таблица

Средние относительные стандартные ($\sigma Q / \bar{Q}$) и максимальные ($\Delta Q_m / \bar{Q}$) отклонения энергии импульсов мощности и стандартные отклонения колебаний ОПО (σ_{xO}) и ДПО (σ_{xD}), а также относительная интенсивность флуктуаций мощности, коррелирующая с вибрациями ПО ($\eta_{\text{по}}^2$) и с протеканием натрия через активную зону (η_{Na}^2) на различных этапах вывода реактора на мощность 2 МВт

W, МВт	$\sigma Q / \bar{Q}, \%$	$\Delta Q_m / \bar{Q}, \%$	$\sigma_{xO}, 10^{-3}$ мм	$\sigma_{xD}, 10^{-2}$ мм	$\eta_{\text{по}}^2$	η_{Na}^2
1,0	$2,8 \pm 0,04$	20 ± 1	$6,1 \pm 0,3$	$3,7 \pm 0,1$	0,55	0,30
1,25	$3,1 \pm 0,1$	20 ± 1	$4,0 \pm 0,3$	$3,4 \pm 0,1$	0,53	0,28
1,50	$3,5 \pm 0,3$	24 ± 3	$4,5 \pm 0,2$	$3,7 \pm 0,3$	0,49	0,29
1,75	$4,2 \pm 0,2$	25 ± 1	$4,8 \pm 0,1$	$5,4 \pm 1,0$	0,61	0,18
2,0	$5,4 \pm 0,5$	36 ± 5	$7,1 \pm 2,5$	$4,2 \pm 0,1$	0,62	0,17
1,8	$6,8 \pm 0,1$	41 ± 2	$7,5 \pm 0,5$	$5,3 \pm 0,1$	0,69	0,12
0,0	-	-	$4,1 \pm 0,1$	$2,3 \pm 0,1$	-	-
1,0	$2,9 \pm 0,1$	20 ± 1	$3,9 \pm 0,1$	$2,3 \pm 0,1$	0,55	0,21
2,0	$4,6 \pm 1,0$	32 ± 4	$6,0 \pm 1,5$	$4,0 \pm 1,4$	0,51	0,20

Перед подъемом мощности реактор работал при средней мощности 1 МВт со стабильными /в среднем/ параметрами флуктуаций мощности и вибраций ПО. Спектр S_Q и спектры поперечных отклонений ОПО (S_O) и ДПО (S_D), соответствующие этому периоду, приведены на рис. 2. Затем мощность ступенями изменялась в большую или меньшую сторону. Однако полные флуктуации реактивности и их часть, коррелирующая с вибрациями ПО $\sigma\epsilon_{\text{по}}$, непрерывно росли /см. рис. 1/. Расчетные эффекты реактивности $\sigma\epsilon_{\text{пор}}$, т.е. эффекты $\sigma\epsilon_{\text{по}}$, полученные на основе измеренных данных о поперечных отклонениях ПО, были близки к $\sigma\epsilon_{\text{по}}$ /см. сноску на стр. 4/. Наличие корреляции $Q - X$ на частоте f_j определялось из условия $\gamma_{QX}^2(f_j) \geq 0,5$, где γ_{QX}^2 - функция когерентности между вибрациями ПО и колебаниями мощности.

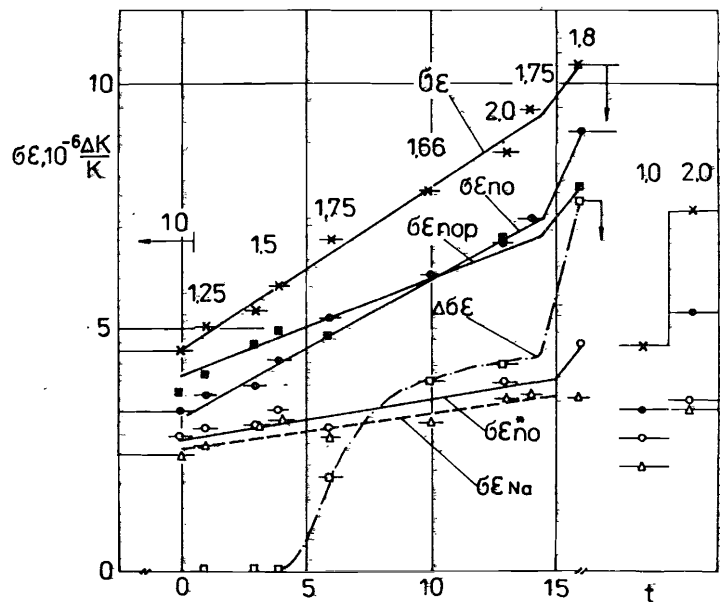


Рис. 1. Режим 5 1/с. Первый выход на мощность 2 МВт. Величина стандартного отклонения случайных колебаний реактивности в зависимости от времени непрерывной работы ПО (t , сутки). Момент времени $t = 0$ соответствует подъему мощности выше 1 МВт. Цифрами на рисунке отмечен уровень средней мощности в МВт. \odot - полные флуктуации реактивности ($\sigma\epsilon$), \bullet - часть полных флуктуаций, коррелирующая с вибрациями ПО ($\sigma\epsilon_{по}$), Δ - часть полных флуктуаций, связанная с протеканием натрия через активную зону ($\sigma\epsilon_{Na}$), \circ - флуктуации внешней реактивности от вибраций ПО, \oplus - расчетная оценка $\sigma\epsilon_{по}$ ($\sigma\epsilon_{пор}$), \square - компонента реактивности, причинно связанная с дефектом ПО ($\Delta\sigma\epsilon$).

*Равенство $\sigma\epsilon_{по} \approx \sigma\epsilon_{пор}$ приближенно выполняется, если в расчетной модели $1/\lambda$ использовать значение температурного коэффициента реактивности $K_T = 2,6 K_{TO}$, где $K_{TO} = (5-6) \cdot 10^{-6} 1/град$ - значение K_T , оцененное из динамических экспериментов при характерных временах развития процесса более $2 c^{1/2}$, а колебания ОПО и ДПО рассматривать статистически независимыми.

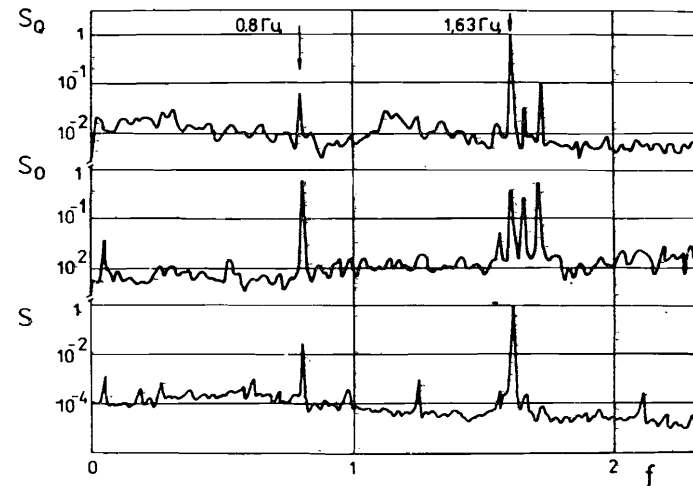


Рис. 2. Типичная форма спектральной плотности колебаний энергии импульсов мощности S_0 и осевых отклонений ОПО S_0 и ДПО S_d перед выходом на мощность 2 МВт. $W = 1$ МВт, $G = 80$ м³/ч, f - частота, Гц.

Компонент "натриевых" шумов $\sigma\epsilon_{Na}$ /рис. 1/ слабо зависит от времени и в основном соответствует уровню мощности*. С течением времени ($t > 0$) продолжающийся линейный рост $\sigma\epsilon$ и $\sigma\epsilon_{по}$ привел к тому, что при $W = 1,8$ МВт случайные колебания реактивности возросли до $\sim 10,5 \cdot 10^{-6} \Delta K/K$ /на рис. 1 ось t имеет разрыв/, а еще через некоторое время реактор был остановлен из-за поломки одного из датчиков быстрых "нулей", укрепленного на валу ДПО. Последующий подъем мощности до 1 МВт и далее до 2 МВт показал, что параметры реакторных шумов стабилизировались и в диапазоне $1 \div 2$ МВт соответствовали типичным $\sigma\epsilon_{пот}$. Так, например, при нормальной работе реактора величина $\sigma\epsilon_{пот}$ при $1 \leq W \leq 2$ МВт в первом приближении линейно зависит от W и в данном цикле измерений может быть представлена в виде:

$$\sigma\epsilon_{пот} = [3,35 + 1,9(W - 1)] \cdot 10^{-6} \Delta K/K; W, \text{ МВт.}$$

Разность $\Delta\sigma\epsilon(t)$ между величиной $\sigma\epsilon_{по}$ и ее ожидаемым /типичным/ значением $\sigma\epsilon_{пот}$ равна $\Delta\sigma\epsilon(t) = [\sigma\epsilon_{по}^2(t) - \sigma\epsilon_{пот}^2]^{1/2}$. Ее мож-

*При нормальных условиях охлаждения активной зоны величина $\sigma\epsilon_{Na}$ с ростом W возрастает незначительно.

но интерпретировать как появление некоторого дополнительного /нетипичного/ эффекта, причинно связанного с обнаруженным дефектом ПО. Такая интерпретация $\Delta\sigma\epsilon$ основана на следующем:

1/ Сам факт появления необычного и значительного по величине дополнительного эффекта реактивности (максимальное зарегистрированное значение $\Delta\sigma\epsilon$ составляло $7,5 \cdot 10^{-6} \Delta K/K$).

2/ Линейная связь $\sigma\epsilon_{по}$ со временем работы ПО.

3/ Исчезновение $\Delta\sigma\epsilon$ после поломки датчика.

Приняв в качестве рабочей гипотезы наличие причинно-следственной связи между $\Delta\sigma\epsilon$ и дефектом ПО, появление $\Delta\sigma\epsilon$ можно объяснить следующим образом. При отсутствии дефекта осевые вибрации ПО характеризуются устойчивым соотношением отдельных компонентов их спектра, а флуктуации амплитуды колебаний на основной частоте $\sim 1,63$ Гц в среднем постоянны /при фиксированном значении W /. Появление дефекта стимулировало дополнительные возмущения, изменившие общую картину вибраций ПО /сравним рис. 2,3/. В частности, в спектрах S_O и S_D /рис. 3/ появился значительный компонент случайного /распределенного в широкой области частот/ шума. Кроме того, амплитуда /а возможно, и фаза/ колебаний ПО на основной частоте $\sim 1,63$ Гц стала настолько неустойчивой /одна из причин - "размытие" амплитуды "белым" шумом/, что сам пик 1,63 Гц в спектрах S_O и S_D , а соответственно, и в S_Q практически исчез. Однако, как и прежде, основная мощность детерминированных колебаний

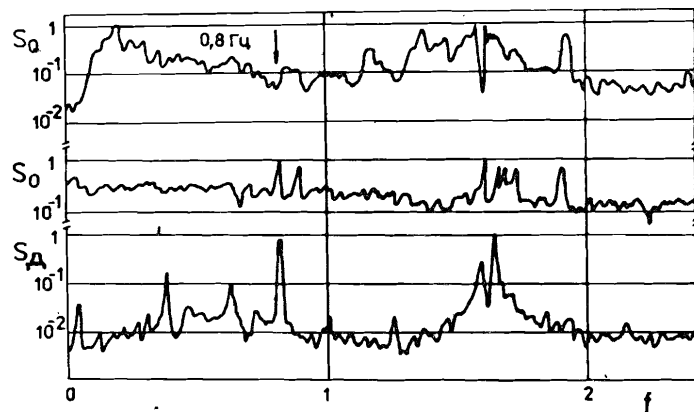


Рис. 3. Спектральная плотность флуктуаций энергии импульсов мощности S_Q и колебаний ОПО S_O и ДПО S_D в процессе вывода реактора на мощность 2 МВт. $W = 2$ МВт, $G = 80$ м³/ч, f - частота, Гц.

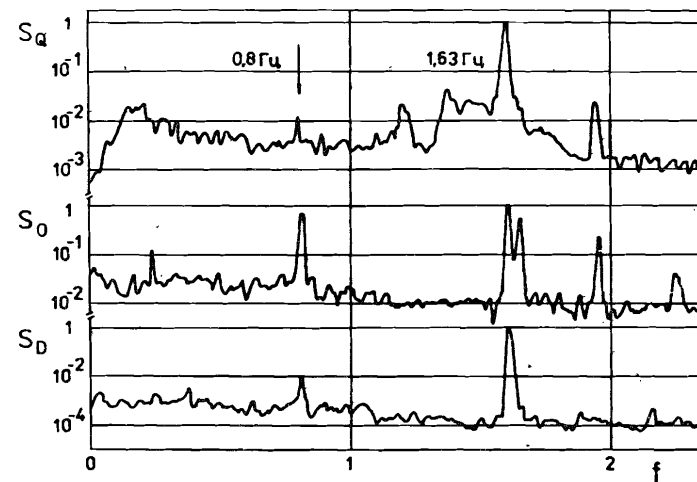


Рис. 4. Спектральная плотность флуктуаций энергии импульсов мощности S_Q и колебаний ОПО S_O и ДПО S_D после поломки датчика на валу ДПО и устранения дефекта. $W = 2$ МВт, $F = 85$ м³/ч, f - частота, Гц.

оказалась сосредоточенной вблизи этой частоты. После устранения дефекта общая картина вибраций ПО практически восстановилась /рис. 4/. Как видно из рис. 1, измеренные колебания ПО в меньшей степени отражали развитие дефекта, чем колебания мощности. В первую очередь это связано с тем, что на частотах выше 1 Гц модуль передаточной функции реактора больше единицы. В результате - даже незначительное увеличение флуктуации внешней реактивности приводит к заметному росту флуктуаций мощности.

3. ВОЗМОЖНАЯ СХЕМА НЕПРЕРЫВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ОБЩЕГО СОСТОЯНИЯ ПО ПО АНАЛИЗУ ШУМОВ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСОВ МОЩНОСТИ

Существующая в настоящее время на реакторе ИБР-2 методика измерения реакторных параметров /3/ позволяет надежно регистрировать достаточно малые флуктуации реактивности ($\sigma\epsilon \approx 10^{-6} \div 10^{-7} \Delta K/K$), в том числе и флуктуации, обусловленные вибрациями ПО. Наиболее простая схема непрерывного контроля общего состояния ПО, реализация которой возможна, например, на малой ЭВМ, состоит в следующем.

$$1. Q(t)_N, X(t)_N, \Delta t = \frac{N}{f_0}.$$

Измерение N последовательных значений энергии импульсов мощности $Q(t)$ и осевых колебаний ПО $X(t)$; Δt - время измерения; f_0 - частота следования импульсов мощности.

2. $Q(t)_N \rightarrow S_Q(f)_K$; $X(t)_N \rightarrow S_X(f)_K$ - вычисление спектральной плотности процессов $Q(t)$ и $X(t)$; K - число дискретных значений частоты.

3. $\gamma_{QX}^2(f) = \frac{|S_{QX}|^2}{S_Q S_X}$ - вычисление функции когерентности.

4. Определение частот f_j , на которых наблюдается корреляция $Q-X$, из условия: $\gamma_{QX}^2(f_j) \geq 0,5$, $j = \overline{0, n}$, $n = 0, 1, 2, \dots$ ($n \leq K$).

5. $\sigma_{\text{по}}^2 = \int_{\Delta f_j} S_Q(f) df$ - вычисление части дисперсии, коррелирующей с вибрациями ПО. Если $n = 0$ /см. п.4/, $\sigma_{\text{по}}^2$ принимается равной $\sigma^2 = \int_0^{f_0/2} S_Q(f) df$.

6. $\frac{\sigma_{\text{по}}^2}{\sigma_{\text{по}}^2} > \frac{\sigma_{\text{по}}^2}{\sigma_{\text{по}}^2} + \mu \sigma_c$ - критерий отбора аномальных состояний ПО, $\frac{\sigma_{\text{по}}^2}{\sigma_{\text{по}}^2}$ - среднее значение дисперсии, принятое в качестве базового для нормальных условий работы ПО, σ_c - стандартное отклонение распределения величины $\sigma_{\text{по}}^2$; μ - параметр, задающий значимость указанного критерия.

$n > n_0$ - дополнительный критерий появления нарушений /изменений/ в работе ПО; n_0 - типичное число пиков в спектре, коррелирующих с вибрациями ПО.

Указанная схема по сути и была использована в данной работе /в режиме "off-line"/. Ее реализация на малой ЭВМ возможна, например, при следующих параметрах:

1. $N = 512$, $\Delta t = 102$ с ($f_0 = 5$ 1/с).

При организации перекрытия соседних наборов данных время измерения может быть уменьшено до величины, равной времени обработки.

2. $K = 256$, разрешение по частоте - 0,01 Гц. Используется алгоритм быстрого преобразования Фурье.

Реализация приведенного выше алгоритма на малой ЭВМ, например, на ЭВМ СМ1300.01, позволяет получить время реакции системы на появление аномальных ситуаций в колебаниях ПО или мощности, равное 20÷30 с. При этом отклонения мощности σ_Q/Q , свидетельствующие о появлении аномалии в работе ПО, составляют 1÷2%, т.е. намного меньше отклонений, при которых срабатывает аварийная защита реактора /+50%/.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шабалин Е.П. ОИЯИ, Р11-85-776, Дубна, 1985.
2. Пепельшев Ю.Н., Попов А.К., Рогов А.Д. ОИЯИ, Р13-83-471, Дубна, 1983.
3. Вагов В.А. и др. ОИЯИ, Р13-82-533, Дубна, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 июля 1987 года.

Пепельшев Ю.Н.

13-87-565

О возможности идентификации аномальных состояний реактора ИБР-2 по шумам мощности

Рассматривается возможность идентификации аномальных состояний реактора ИБР-2 и системы подвижных отражателей /ПО/ по шумам мощности. В качестве конкретного примера анализируется ситуация, когда развитие одного скрытого дефекта в системе ПО привело к временной остановке реактора. Приводится наиболее простой алгоритм контроля общего состояния ПО по шумам мощности. Показано, что реализация этого алгоритма на малой ЭВМ позволяет в режиме, близком к режиму реального времени, осуществлять текущий контроль системы ПО.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Pepolyshv Yu.N.

13-87-565

On a Possibility to Identify IBR-2 Reactor Anomalous States by Power Noises

The possibility is examined of the identification of the anomalous state of the IBR-2 reactor and the system of the moving reflectors with power noises. As a concrete example, the situation is analysed when the development of one latent defect in the moving reflectors system leads to the reactor stop. The simplest algorithm of the control of the general moving reflector with power noises state is given. It is shown that the realization of the given algorithm on the mini-computer makes it possible to realize in the condition near to the real time the moving system control.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987