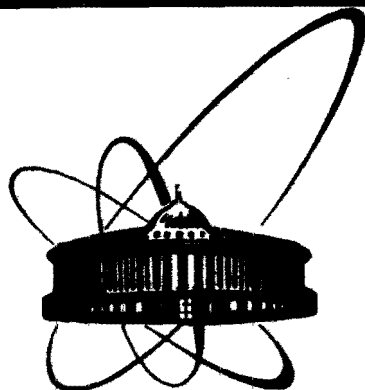


87-564



сообщения
Объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

РЗ48а

6842/87

13-87-564

Ю. Н. Пепёлышев

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ
ПОДВИЖНЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ
(ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПУСК РЕАКТОРА ИБР-2)

1987

ВВЕДЕНИЕ

Модулятор реактивности /МР/ импульсного реактора ИБР-2 во многом определяет условия стабильной и безопасной работы реактора. Из-за механических вибраций основного /ОПО/ и дополнительного /ДПО/ подвижных отражателей /ПО/ МР является одним из основных источников неконтролируемых случайных возмущений внешней реактивности. Исследования МР с ДПО в виде "трезубца", проведенные перед началом энергетического пуска^{1/1}, показали, что вибрации МР малы, и ожидаемые флуктуации мощности должны быть существенно меньше допустимых. Однако не были ясны проявления различных термомеханических эффектов, возникающих в процессе вывода реактора на мощность, и их воздействие на уровень и устойчивость вибраций ПО. Кроме того, при большом уровне мощности в условиях интенсивного радиационного облучения характер колебаний ПО мог существенно изменяться. Поэтому для определения режима безопасной работы МР и оценки случайных эффектов реактивности, обусловленных вибрациями ПО, динамические параметры МР исследовались на протяжении всего периода энергетического пуска, начиная с 1979 г. и по июнь 1984 г.

В работе представлены основные результаты этих исследований.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На вибрации ПО влияют многие элементы его привода. Принципиальная кинематическая схема передачи вращения от синхронного двигателя /СД/ на ОПО и ДПО показана на рис.1. Там же отмечены места установки измерительных датчиков. Наиболее подробно исследовались поперечные отклонения ОПО и ДПО $/X_o, X_d/$, периоды вращения ОПО и ДПО $/T_o, T_d/$ и угол рассинхронизации лопастей ПО при их вращении $/\varphi/$.

В качестве измерительной системы использовалась система для корреляционного и спектрального анализа реакторных параметров, выполненная на основе ЭВМ PDP-11/20 и стандарта КАМАК^{2/}. В процессе измерения в памяти ЭВМ регистрировался двухкомпонентный временной ряд:

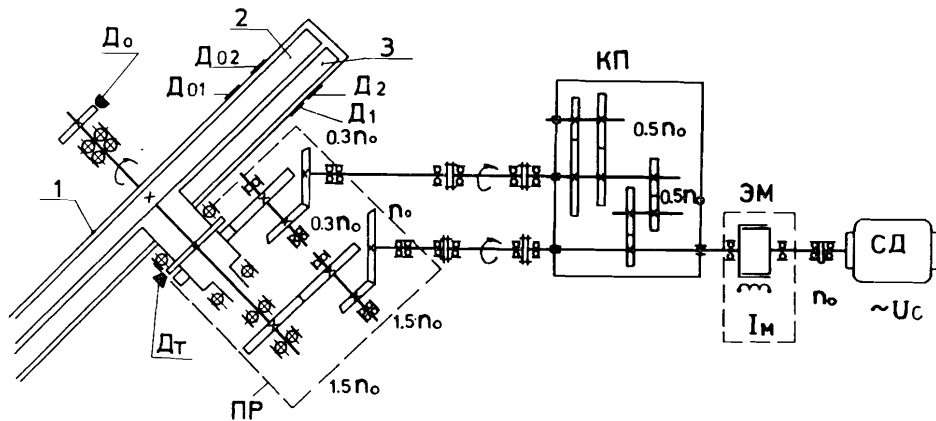


Рис.1. Принципиальная схема привода подвижных отражателей и расположение измерительных датчиков. 1 - кожух ПО, 2 - ОПО, 3 - ДПО, ПР - поворотный редуктор, КП - коробка передач, ЭМ - электромагнитная муфта, СД - синхронный двигатель, Д₀₁, Д₀₂, /Д₁, Д₂/ - емкостные датчики положения ОПО /ДПО/, Д₀/Д_Т/ - датчики оборотов ОПО /ДПО/. n₀ - частота вращения ротора двигателя /n₀ = 1000 об/мин/.

(X_i, Y_i), i = 1, 8192; X, Y = X₀, X_д, T₀, T_д, φ. /1/

Частота опроса /f_{опр}/ соответствовала частоте вращения ОПО /f₀ ≈ 25 Гц/ или ДПО (f_д = f₀/5). Основная обработка данных проводилась на ЭВМ CDC-6500 и основывалась на статистическом анализе стационарных временных рядов /3,4/.

Исследовались два режима вращения ПО: с заторможенным ДПО /f_д = 0 Гц, режим 25 Гц/ и с ДПО, вращающимся с частотой f_д = f₀/5 /режим 5 Гц/.

Все измерения, за исключением регистрации переходных процессов, проводились в практически установившемся температурном режиме работы ПО.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные экспериментальные данные содержали свыше 300 отдельных реализаций, в которых колебания ПО фиксировались за время от 7 до 60 мин в частотном диапазоне от /0,0012 ± 0,05/ Гц до 2 кГц /2 кГц - верхняя граничная частота аналоговой измерительной электроники/.

2.1. Режим 25 Гц

Основные сведения о средних значениях стандартного отклонения σ_х и размаха ΔX_м = X_{max} - X_{min} поперечных колебаний ОПО представлены в табл.1.

Таблица 1

Режим 25 Гц. Усредненные значения стандартного отклонения σ_х и размаха ΔX_м поперечных колебаний ОПО при некоторых уровнях средней мощности реактора /σ_х, ΔX_м приведены в единицах 10⁻³ мм/

W, МВт	Верхний датчик				Нижний датчик			
	→		→		→		→	
	σ _х	ΔX _м	σ _х	ΔX _м	σ _х	ΔX _м	σ _х	ΔX _м
0	8,1 ^{+0,1} _{-0,2}	54 ^{+0,3} _{-0,2}	5,4 ^{+0,4} _{-0,3}	38 ^{+0,3} _{-0,1}	6,6 ^{±0,3}	40 ^{±0,2}	3,7 ^{±0,2} ^{***}	33 ^{±0,5}
0,4	-	-	5,1 ^{±0,1}	35 ^{+0,1} _{-0,2}	-	-	3,2 ^{±0,2}	29 ^{±0,3}
0,6	7,0 ^{±0,1}	42 ^{±0,2}	5,5 ^{±0,1}	37 ^{±0,1}	6,0 ^{±0,1}	41 ^{±0,1}	-	-
1,0	7,0 ^{±0,1}	42 ^{±0,1}	5,8 ^{±0,1}	36 ^{±0,1}	6,3 ^{±0,1}	42 ^{+0,2} _{-0,3}	-	-
1,5	8,2 ^{±0,2}	49 ^{±0,1}	5,7 ^{+0,4} _{-0,1}	38 ^{±0,7}	9,8 ^{***}	52	4,5 ^{±1,5}	36 ^{±1,5}
2,0	8,7 ^{±0,2}	57 ^{±0,2}	6,2 ^{±0,4}	41 ^{±0,3}	-	-	4,0 ^{±0,5}	29 ^{±0,4}
0+2,0	7,8 ^{+1,0} _{-0,8}	50 ⁺⁷ ₋₈	5,6 ^{±0,6}	38 ^{±3}	6,3 ^{±0,3}	44 ⁺⁸ ₋₄	3,9 ⁺² _{-0,8}	32 ⁺⁴ ₋₃
	средние значения							

* Край лопасти ОПО, первым набегающий на датчик.

** Получено при W = 10 кВт.

*** Значение не очень надежно.

Значения σ_х и ΔX_м в табл.1 приведены с максимальными отклонениями, полученными в отдельных измерениях. При любых условиях работы ПО и любом уровне мощности /W ≤ 2 МВт/ величина ΔX_м связана с σ_х соотношением:

$$\Delta X_m \approx (7 \pm 1) \sigma_x \text{ - для верхнего датчика,}$$

$$\Delta X_m \approx (8 \pm 3) \sigma_x \text{ - для нижнего датчика,}$$

а форма распределений плотности вероятности отклонений P(X) и P(ΔX), где ΔX = X_{i+1} - X_i - быстрые отклонения лопасти от оборота к обороту, близка к гауссовой. Как следует из табл.1, край лопасти, первым набегающий на датчик, в среднем отклоняется в ~ 1,35, а задний - в ~ 1,14 раза больше се-

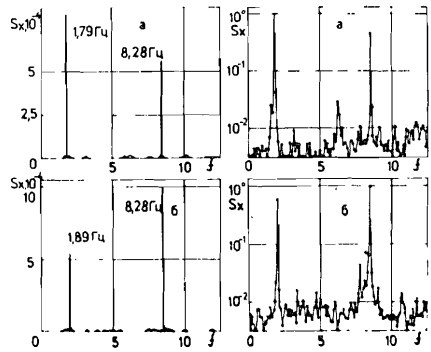


Рис.2. Режим 25 Гц. Спектральная плотность мощности поперечных колебаний средней части лопасти ОПО $S_x / \text{мм}^2 \text{с} / \text{Вт} = 0,4 \text{ МВт}, 6 / W = 2 \text{ МВт}, f - \text{частота в Гц}.$

редины. Спектральный состав поперечных отклонений ОПО, "видимый" датчиком и, соответственно, активной зоной, представлен в основном двумя детерминированными /гармоническими/ компонентами на частотах $\sim 1,8 \text{ Гц}$

и $8,2 \text{ Гц}^*$ /рис.2/. Суммарная интенсивность /энергия/ этих колебаний, отнесенная к полной энергии поперечных колебаний ОПО, практически не зависит от мощности реактора и ее значение для обоих датчиков совпадает и равно: 74% - для краев лопасти и $167 \pm 5\%$ - для середины лопасти. При этом интенсивность отдельных колебаний, $\sigma_{1,v}^{*2}(v,2)$, определенная в виде

$$\sigma_{1,v}^{*2} = \int_{\Delta f} S_x(f) df,$$

где Δf - ширина соответствующего пика в спектральной плотности колебаний ОПО $/S_x(f)/$, существенно зависит от мощности. В то же время, как следует из табл.1, полная энергия /дисперсия/

колебаний ОПО $\sigma_x^* = \int_0^{f_0/2} S_x(f) df$ с изменением W меняется незначительно. При $W \geq 0,6 \text{ МВт}$ величины $\eta_{1,v}^2 = \frac{\sigma_{1,v}^{*2}}{\sigma_x^{*2}}$ и $\eta_{v,2}^2 = \frac{\sigma_{v,2}^{*2}}{\sigma_x^{*2}}$ осциллируют с периодом осцилляции по W , равным 1 МВт:

$$\eta_{1,v}^2 \approx 0,22 - 0,03 \cos[2\pi(W - 0,6)] \quad /2/$$

$$\eta_{v,2}^2 \approx 0,45 + 0,03 \cos[2\pi(W - 0,6)].$$

* Реальные непрерывные колебания ОПО наблюдаются датчиком или активной зоной в дискретные моменты времени с частотой, определяемой скоростью вращения ОПО $/f_0 = 25 \text{ Гц}/$, поэтому все частоты с $f > f_{кр} = f_0/2$ оказываются "свернутыми" в диапазон $[0, f_{кр}]$

Таким образом, $\sim 67\%$ мощности поперечных колебаний ОПО, ответственных за флуктуации реактивности, обусловлены детерминированными колебаниями, а 33% равномерно распределены в частотном диапазоне $[0, 12,5] \text{ Гц}^*$. Размах гармонических колебаний ОПО ΔX_j /двойную среднюю амплитуду/ удобно оценить в виде $\Delta X_j \approx 2\sqrt{2} \sigma_j^*$ или

$$\Delta X_j = 2\sqrt{2} \sigma_x^* \eta_j, \quad /3/$$

где σ_x^* и η_j определены выше, $j = 1,8; 8,2 \text{ Гц}$. Поскольку в процессе спектральной обработки выполнялось равенство $\sigma_x^{*2} \approx \sigma_x^2$, где σ_x^2 - дисперсия поперечных колебаний ОПО, то в качестве оценки σ_x^* при определении ΔX_j можно использовать данные табл.1. Оценим в качестве примера среднюю величину ΔX_j при $W = 2 \text{ МВт}$ /см. выражение /2/ и /3//:

$$\Delta X_{1,v} \approx 0,01 \text{ мм}, \quad \Delta X_{v,2} \approx 0,014 \text{ мм} - \text{верхний датчик}$$

$$\Delta X_{1,v} \approx 0,004 \text{ мм}, \quad \Delta X_{v,2} \approx 0,01 \text{ мм} - \text{нижний датчик}.$$

Верхняя оценка ΔX_{jm} , учитывающая разброс величины ΔX_j в отдельных измерениях, не превышает $\Delta X_{jm} \leq 2\sqrt{2} \sigma_x \eta_{\Sigma}$ и справедлива при любой мощности реактора от 0 до 2 МВт /здесь $\eta_{\Sigma}^2 = \eta_{1,v}^2 + \eta_{v,2}^2$ /.

В связи с тем, что показания датчиков положения ОПО /верхнего X_v и нижнего X_H / различаются /например, по данным табл.1 среднее отношение стандартных отклонений ОПО $\langle \sigma_{Xv} / \sigma_{XH} \rangle$ в диапазоне мощности $[0,2] \text{ МВт}$ равно 1,47, а в диапазоне $[1,2] \text{ МВт}$ - 1,41/, возникает вопрос: не является ли это различие следствием вибраций кожуха? Определить влияние кожуха можно следующим образом. Рассмотрим пространственно-временной интервал между перемещением лопасти ОПО от нижнего датчика к верхнему в виде некоторого "черного ящика" с коэффициентом передачи $H(f)$. По данным виброперемещений собственными вибрациями кожуха в месте крепления нижнего датчика можно пренебречь /датчик закреплен вблизи массивной станины/. Тогда при отсутствии в показаниях верхнего датчика помех от вибраций кожуха коэффициент $H_1(f) = (S_B / S_H)^{1/2}$, учитывающий помеху, будет равен коэффициенту $H_2(f) = S_{vH} / S_H$, минимизирующему /в смысле наименьших квадратов/ влияние помехи. Здесь S_B, S_H, S_{vH} - спектральные плотности измеренных колебаний соответственно для верхнего и нижнего датчиков и их взаимная спектральная

* Реальный /непрерывный/ шум случайных колебаний ОПО может находиться в диапазоне $[0,2] \text{ кГц}$ и распределяться в нем неравномерно.

плотность. Из корреляционных измерений $X_H - X_B$ следует, что на частотах основных колебаний ОПО равенство $N_1 = N_2 = N$ в среднем выполняется. При этом коэффициент передачи в диапазоне мощности от 1 до 2 МВт изменяется в пределах: $N(1,8 \text{ Гц}) = 1,8 \div 2,25$; $N(8,2 \text{ Гц}) = 0,6 \div 1,3$. Кроме того, спектральную

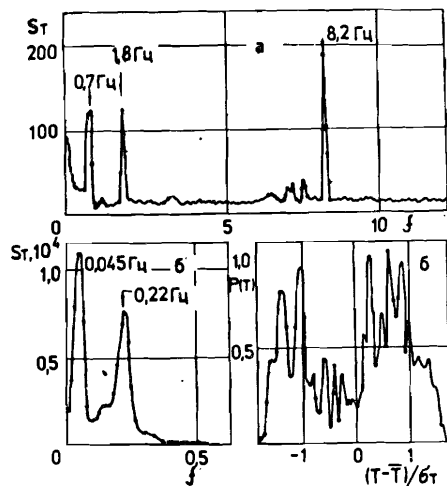
плотность колебаний кожуха S_K можно непосредственно определить в виде: $S_K = S_B(1 - \gamma_{BH}^2)$, где $\gamma^2 = S_{BH}^2/S_B \cdot S_H$ - функция когерентности. На частотах 1,8 и 8,2 Гц функция γ^2 равна 1, а в остальной части спектра - 0,1. Таким образом, показания верхнего датчика не искажены дополнительными,

по отношению к нижнему датчику, шумами $\eta_{\Sigma B}^2 \approx \eta_{\Sigma H}^2$ и "жестко" коррелируют на частотах 1,8 и 8,2 Гц $1/\gamma^2 = 1$. Отсюда следует, что различие колебаний ОПО относительно двух датчиков в основном зависит от места встречи ОПО с ДПО, и в связи с этим абсолютные отклонения ОПО относительно активной зоны могут отличаться от измеренных.

Таким образом, эффекты реактивности, определенные по показаниям точечного датчика, следует считать оценочными. Из числа других параметров МР подробно исследовались флуктуации периода вращения ОПО. Неравномерность периода вращения ОПО мала и на интервале времени менее 10 минут составляет:

$$\sigma_T = 16_{-10}^{+18} \text{ мкс } / \sigma_T/T \approx 4 \cdot 10^{-4} /,$$

$$\Delta T_m = 81_{-37}^{+55} \text{ мкс } (\Delta T_m/T = (2 \pm 1,3) \cdot 10^{-3}) \text{ при максимальных быстрых отклонениях /за один оборот/, равных } \delta(\Delta T)_m = \begin{matrix} +22 \\ -14 \end{matrix} \text{ мкс.}$$



Характерная форма спектра S_T и плотности распределения вероятности $P(T)$ колебаний периода вращения ОПО приведены на рис.3.

Рис.3. Режим 25 Гц. Спектральная плотность мощности S_T (мкс²с) и плотность распределения $P(T)$ отклонений периода вращения ОПО. Средняя мощность реактора 0,3 МВт, f - частота в Гц. а/ Колебания на интервале времени $\Delta T = 4,4$ мс между моментами прохождения ОПО мимо двух емкостных датчиков ($f_{кр} = 12,5$ Гц). б/ Типичная форма S_T и $P(T)$.

2.2. Режим 5 Гц

Колебания ПО исследовались в зависимости от работы системы стабилизации скорости ОПО $/V_{ОПО}/$, частоты вращения ПО уровня средней мощности реактора и времени наработки ПО. В табл.2 представлены средние оценки некоторых закономерных соотношений, наблюдаемых в колебаниях ПО в течение всего периода энергетического пуска. Для данных, приведенных в табл.2, характерно возрастание величины σ_i и $\Delta X_{mi} / i = X_O, X_D, \phi, T_O,$

Таблица 2

Режим 5 Гц. Относительное изменение средней величины стандартного σ и максимального отклонений в колебаниях X_O, X_D, T_O, T_D и ϕ при изменении режима вращения ПО, смены датчика и смены "точки" наблюдения колебаний на лопастях ОПО и ДПО /пояснения в тексте/

Измеряемый параметр	1			2		3	
	Без стабилиз. скорости со стабилиз. скорости*		"Жесткий" режим	"Мягкий" режим		Верхн. датчик нижн. датчик (Край лопасти середина лопасти)	
X_O	σ_X	1,9	1,3	1,67 ± 0,05			
	ΔX_m	1,4	1,1	(1,13 ± 0,25)			
X_D	σ_X	1,6	1,6	1,04 ± 0,07			
	ΔX_m	2	1,4	(0,94 ± 0,10)			
ϕ	σ_ϕ	1,8	2,0				
	$\Delta \phi_m$	1,6	2,6				
T_O	σ_{T_O}	-	6				
	ΔT_m	-	5				
T_D	σ_{T_D}	-	2,7				
	ΔT_m	-	4				

* Для штатной системы стабилизации скорости вращения ОПО.

$T_{д/}$ при включении системы стабилизации. $V_{ОПО}$ /1-й столбец/ или при переходе с "мягкого" режима вращения ПО к "жесткому" /2-й столбец/. В третьем столбце табл.2 приведены средние оценки осевых колебаний ОПО и ДПО для верхнего датчика по отношению к нижнему и краев лопасти ОПО по отношению к середине /в скобках/, а для ДПО - середины крайних "зубьев" относительно середины среднего "зуба". Подробные данные о колебаниях отдельных параметров ПО приведены ниже.

2.2.1. Поперечные /осевые/ колебания ОПО и ДПО

Средние значения σ_x и ΔX_m , измеренные в различные периоды работы реактора при разном значении мощности, представлены в табл.3.

Таблица 3

Режим 5 Гц. Стандартное отклонение σ_x и размах ΔX_m поперечных колебаний ОПО и ДПО в различные периоды энергетического пуска. /Нижние емкостные датчики, мягкий режим вращения ПО, середина отражателей/

Время измерения	Мощность реактора, кВт	Частота импульсов, $f_0, 1/с$	О П О		Д П О	
			$\sigma_x, мм$	$\Delta X_m, мм$	$\sigma_x, мм$	$\Delta X_m, мм$
1981 г.	$\leq 0,28$	4,89	$0,009 \pm 0,002$	$0,057 \pm 0,006$	$0,046 \pm 0,002$	$0,29 \pm 0,03$
1982 г.	400	$4,89 \pm 4,91$	$0,0063 \pm 0,001$	$0,087 \pm 0,005$	$0,029 \pm 0,003$	$0,473^{+0,042}_{-0,079}$
10 февр. - 4 марта 1983 г.	0+30	4,89	-	-	$0,022 \pm 0,003$	$0,100 \pm 0,02$
24 ноября 1983 г. + 21 марта 1984 г.	970	$4,91 \pm 4,95$	$0,0056^{+0,003}_{-0,002}$	$0,047^{+0,003}_{-0,01}$	$0,035^{+0,004}_{-0,008}$	$0,15^{+0,02}_{-0,05}$
апрель 1984 г.	1250-1940	$4,92 \pm 4,93$	$0,0051^{+0,004}_{-0,001}$	$0,038^{+0,002}_{-0,01}$	$0,044^{+0,002}_{-0,01}$	$0,20^{+0,08}_{-0,05}$

Примечание. Приведенные значения величины разброса получены в отдельных измерениях.

Для колебаний ОПО характерны две основные спектральные структуры, для ДПО - одна. На начальном этапе энергетического пуска /до марта 1983 г. при $W \leq 1$ МВт/ спектр ОПО $/S_0/$ был аналогичен спектру ДПО $/S_{д/}$ и содержал две детерминированные компоненты на частотах 0,8 и $\sim 1,63$ Гц /см.рис.4 при $W = 0,4$ МВт/: В дальнейшем спектр S_0 трансформировался и уже при любой мощности реактора был подобен спектру, представленному на рис.4 при $W = 2$ МВт.

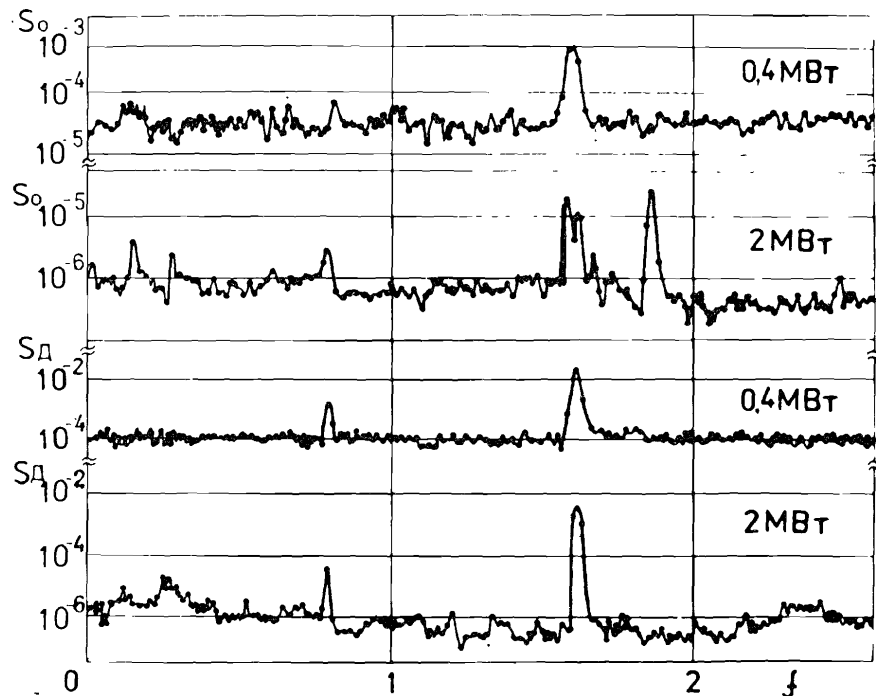


Рис.4. Режим 5 Гц. Две основные структуры спектральной плотности мощности поперечных колебаний ОПО S_0 /мм²/с/ и ДПО $S_{д}$ /мм²/с/, f - частота в Гц. Цифрами на рисунке отмечено значение средней мощности реактора. Форма спектра S_0 при $W = 2$ МВт характерна для работы реактора, начиная с марта 1983 г.

В целом спектр S_0 неустойчив, содержит значительную компоненту случайного "квазибелого" шума /мощность шума составляет $(0,2 \pm 0,71) \sigma_x^2/$, существенно зависит от режима вращения ПО и мощности реактора. С ростом мощности доля шума в спектре S_0 в среднем уменьшается, а интенсивность и флуктуации амплитуды спектральных пиков возрастают. Например, отдельные детерминированные компоненты спектра за исключением пика на частоте $\sim 1,63$ Гц могут принимать значения, близкие к шуму $/10^{-7} \div 10^{-6} \text{ мм}^2/\text{с}/$. Колебания ДПО более стабильны и, как следует из рис.4, почти полностью /в среднем на 93%/ определяются двумя детерминированными компонентами на частотах $\sim 0,8$ и $\sim 1,63$ Гц /следует напомнить, что это наблюдаемые частоты/. С увеличением мощности реактора интенсивность колебаний ДПО перераспределяется в сторону увеличения отношения $\sigma_{1,6}^{*2} / \sigma_x^2$ от 36% / $W = 0$ МВт/ до $\sim 90\%$.

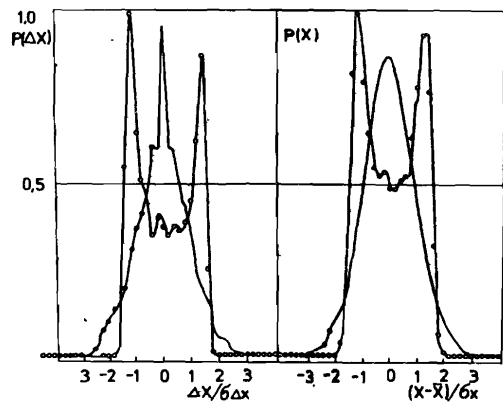


Рис.5. Режим 5 Гц. Плотность распределения быстрых $P(\Delta X)$ ($\Delta X = X_{i+1} - X_i$) и полных $P(X)$ поперечных отклонений ОПО (•) и ДПО (○). $W = 1$ МВт, $f_{\text{опр}} = 5$ Гц.

$/W = 1$ МВт/; т.е. при $W \geq 1$ МВт ДПО практически полностью колеблется на одной частоте, равной 1,63 Гц. Распределения $P(X)$ и $P(\Delta X)$ для ОПО и ДПО /см.

рис.5/ отражают случайный широкополосный характер колебаний ОПО и детерминированность узкополосного спектра колебаний ДПО: для ДПО форма $P(X)$ и $P(\Delta X)$ близка к форме распределения колебаний гармонического осциллятора. Взаимную корреляцию в колебаниях ОПО и ДПО иллюстрирует рис.6.

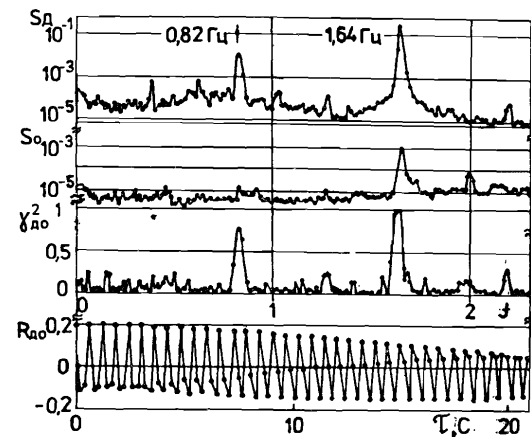


Рис.6. Режим 5 Гц. Корреляция поперечных колебаний ОПО и ДПО. S_d , S_0 , γ_{d0}^2 , R_{d0} - соответственно спектральные плотности мощности /мм²с/, функция когерентности и взаимная корреляционная функция. $W = 1,75$ МВт, апрель 1984 г.; f - частота в Гц, $f_{\text{опр}} \approx 5$ Гц.

Так же, как и в режиме 25 Гц, колебания ПО относительно двух датчиков полностью коррелируют на всех основных частотах /см.рис.7/. Фактически, при оценке σ_x и ΔX_m , показания двух датчиков совпадают с точностью до постоянного множителя /см. табл.2/, а при оценке спектров совпадают их структура и доля шумовой компоненты.

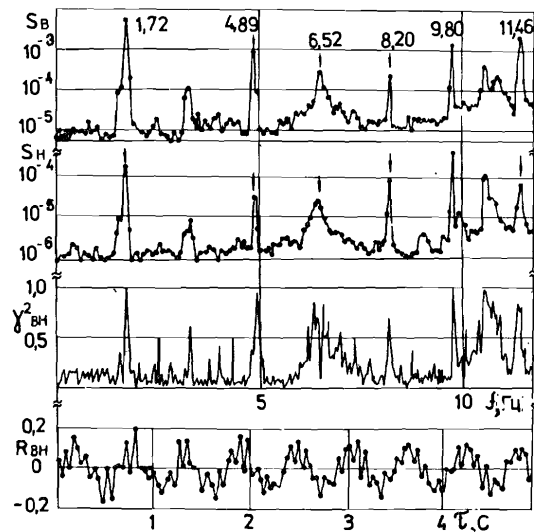


Рис.7. Режим 5 Гц. Корреляция поперечных колебаний ОПО относительно верхнего /В/ и нижнего /Н/ емкостных датчиков. S_B , S_H , γ_{BH}^2 , R_{BH} - соответственно спектральные плотности мощности /мм²с/, функция когерентности и взаимная корреляционная функция. $f_{\text{опр}} = 24,3$ Гц, $W = 1$ МВт /март 1983 г./.

2.2.2. Угол рассинхронизации ОПО-ДПО (φ) и периоды вращения ОПО и ДПО (T_O , T_D)

Разброс величин φ , T_O , T_D в основном зависит от режима вращения ПО /"мягкий" или "жесткий"/ и от работы системы стабилизации скорости ОПО /см.табл.2/. Характеристики разброса колебаний φ , T_O и T_D приведены в табл.4. Они достаточно полно отражают распределение крутильных колебаний, которые при постоянной скорости ПО слабо зависят от времени. Однако в колебаниях T_O и T_D не учитывались медленные, с периодом более 60 мин, отклонения, обусловленные зависимостью частоты вращения ротора синхронного двигателя от частоты питающего его напряжения. Замечено, что даже при использовании штатной системы стабилизации скорости ОПО максимальные отклонения T_O и T_D в течение 3 суток достигали значительной величины $\sim 2\%$. В среднем типичные медленные отклонения T_O и T_D с $f < 0,047$ Гц не превышали $\sim 1\%$, а основная мощность колебаний периодов ПО сосредоточена в частотном диапазоне $[0, 1]$ Гц /см.рис.8, 9/.

В спектре крутильных колебаний (S_φ) 60÷80% полной интенсивности сосредоточено в области реальных частот ниже ~ 1 Гц с основной частотой $\sim 0,6$ Гц. Типичная форма S_φ показана на рис.10. Частота $\sim 1,63$ Гц частично обусловлена мультипликативной помехой от поперечных вибраций ОПО и ДПО.

Режим 5 Гц. Стандартное отклонение и размах крутильных колебаний $\langle \varphi \rangle$ и периодов вращения ОПО и ДПО T_o, T_d при некоторых значениях средней мощности реактора (W) и частоты следования импульсов мощности (f_o)

Время измерения	W, кВт	$\langle f_o \rangle$, Гц	ψ		$\Delta \psi_m$		T_o		T_p	
			град	град	мкс	град	$\delta T / T, \%$	$\Delta T_m / T, \%$	$\delta T / \sqrt{P}, \%$	$\Delta T_m / \sqrt{P}, \%$
			мкс	град	мкс	град				
До 19 января 1981 г.	20,28	4,897	-	200±30	0,35	-	-	-	0,015±0,01	0,05±0,04
		4,90	45±8	336±88	0,59	-	-	-	-	-
		4,91	-	500±50	0,88	-	-	-	-	-
		4,93	-	7700±100	2,99	0,06±0,03	0,3±0,2	0,04±0,02	0,2±0,1	
		4,95	92±5	884±360	1,56±0,63	1,56±0,63	-	-	-	-
май 1982 г.	400	4,91	18±1	0,03	120±16	0,21	-	-	-	
24 ноября 1983 г. +21 марта 1984 г.	1000	4,91+ 4,95	25±20 -10	0,044+0,035 -0,017	216+400 -112	0,38+0,7 -0,2	0,01±0,03	0,06±0,01	0,06±0,02	0,3±0,1
31 марта 1984 г. +12 апреля 1984 г.	1000+ 2000	4,93	20± ±13	0,035±0,02	114±82 -30	0,20+0,14 -0,05	-	-	-	-

* Без стабилизации скорости вращения ОПО.

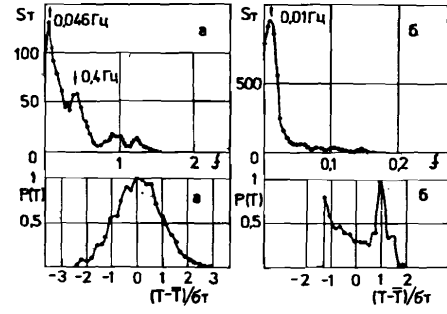


Рис.8. Режим 5 Гц. Спектральная плотность мощности S_T /мкс²/с/ и плотность распределения $P(f)$ колебаний периода вращения ОПО; а/ частота опроса 25 Гц; б/ частота опроса 5 Гц. Средняя мощность реактора 1 МВт, f - частота в Гц.

Рис.9. Режим 5 Гц. Спектральная плотность мощности S_T /мкс²/с/ и плотность распределения $P(f)$ колебаний периода вращения ДПО. а/ W = 0 /1981 г./; б/ W = 1 МВт /1983 г./.

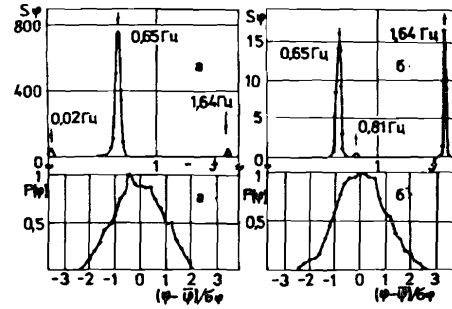
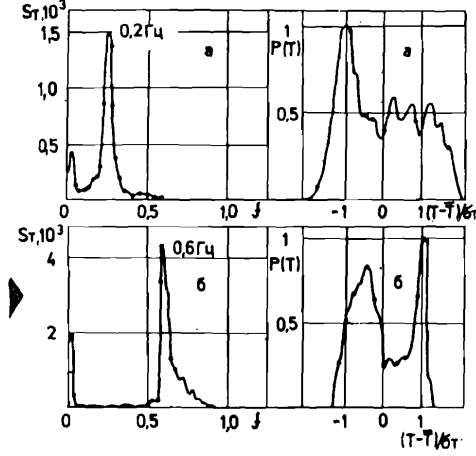


Рис.10. Режим 5 Гц. Спектральная плотность мощности S_φ /мкс²/с/ и плотность распределения $P(\varphi)$ крутильных колебаний ОПО-ДПО. а/ W = 1 МВт /1983 г./; б/ W = 2 МВт /1984 г./; f - частота в Гц.

3. НЕСТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ КОЛЕБАНИЙ ПО

Режим нестационарных колебаний возникает при выбеге или разгоне отражателей и при изменении уровня средней мощности. Но даже в установившемся тепловом режиме реактора и постоянной скорости вращения ПО колебания отражателей не являются стационарными в широком смысле. Они, хотя и в значительно меньшей степени, зависят от многих, кроме указанных в табл.2, факторов, например, от степени прогрета всей конструкции МР, начального угла установки ОПО относительно ДПО, от уровня мощности, и, кроме того, отличаются от запуска к запуску и времени нара-

ботки ПО. Зарегистрированные периоды нарушения стационарности поперечных колебаний ПО сосредоточены в интервалах времени менее ~ 30 мин и более ~ 20 ч.

Так, в установившемся режиме работы реактора средний разброс амплитуды основной компоненты поперечных колебаний ПО на частоте ~ 1,63 Гц $\nu = \sigma_a/\bar{a}$ за время 30 мин равен:

$$\nu = \begin{cases} (20 \div 50)\% - \text{ОПО} \\ (3 \div 5)\% - \text{ДПО} \end{cases}$$

а разброс величины ν за период 2÷3 сут для ОПО и ДПО составляет $\sigma_\nu/\bar{\nu} \approx 15\%$.

Во время переходных процессов, связанных с изменением уровня средней мощности, деформации кожуха и изгиб лопасти ОПО таковы, что величина σ_x и структура колебаний практически соответствуют стационарным, но средняя по распределению $P(X)$ величина \bar{X} /зазор между лопастью ОПО и кожухом/ изменяется во времени. Так, при линейном изменении мощности от 1 до 1,5 МВт со скоростью 8 кВт/мин величина \bar{X} для двух датчиков равна:

$$\bar{X}_B = \bar{X}_{OB} - 3 \cdot 10^{-4} t, \text{ мм}$$

$$\bar{X}_H = \bar{X}_{OH} + 1,2 \cdot 10^{-4} t, \text{ мм,}$$

t - в минутах, \bar{X}_{OB} , \bar{X}_{OH} - начальное среднее положение лопасти относительно верхнего и нижнего датчиков. Изменение зазора

на единицу изменения мощности $\chi = \frac{\Delta \bar{X}}{\Delta W}$ не постоянно и в диапазоне изменения ΔW от -1,0 до 0,5 МВт равно -0,01÷-0,033 мм·МВт⁻¹ для верхнего датчика и -0,0012÷0,013 мм·МВт⁻¹ - для нижнего датчика, т.е. $|\chi_B/\chi_H| = 2,1 \div 3,1$. Противоположные знаки величины χ для двух датчиков могут быть следствием того, что температурные изгибы лопасти ОПО и кожуха направлены в одну сторону /от активной зоны при увеличении мощности/, и наблюдаемый эффект есть разность двух больших эффектов.

Основной нестационарный режим колебаний ПО связан с прохождением резонансов при выбеге или разгоне отражателей. Наибольшие поперечные отклонения ДПО в резонансах не превышали 0,1 мм, а ОПО - 0,07 мм. Используя дополнительные данные по выбегу ПО в режиме 50 Гц/1/, отметим следующее:

а/ резонансы ДПО f_p возбуждаются на частотах, равных относительной частоте вращения ОПО-ДПО $4/5 f_0$ и распределены

на две группы: $f_{pn}' = \frac{4}{5} f_{on} \approx \frac{33}{n}$, $f_{pm}'' = \frac{4}{5} f_{om} \approx \frac{85}{m}$, где $m, n = 1, 2, \dots$; 33,85 - частота собственных колебаний ДПО;

б/ резонансные колебания ОПО возбуждаются при следующей частоте вращения ОПО: 21,6; 20,8÷20,0; 16,7; 16,3÷11,6; 9,14; 7,92 Гц.

Из численного решения уравнения одночастотного осциллятора при переменной частоте вынуждающей силы $f_0(t) = 25e^{-t/483} / t \leq 180 \text{ с/}$, где зависимость $f_0(t)$ определена из кривой выбега, следует, что динамический коэффициент усиления колебаний и частота наблюдаемых резонансов при их прямом и обратном прохождении практически должны совпадать /при условии сохранения жесткости ПО при выбеге и разгоне/. Равенство указанных выше величин при выбеге и разгоне ПО было подтверждено экспериментально. Таким образом, в нестационарном режиме динамические параметры ПО в резонансах должны соответствовать параметрам стационарных резонансных колебаний /при $f_0 = f_p$ /.

4. АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПО

Задача имеет большую степень неопределенности, поскольку при большом числе возможных источников возмущений отсутствуют прямые измерения, подтверждающие форму реального спектра в области частот выше критической частоты Найквиста /для ДПО $f_{kp} \approx 2,5 \text{ Гц}$, для ОПО - 12,5 Гц/. Поскольку характерные частоты вибраций ПО явно выше f_{kp} , то многие компоненты экспериментального спектра f_g являются замаскированными аналогами некоторых реальных частот f_g , связанных с f_g , в виде

$$f_g = 2f_{kp} \cdot n \pm f_g. \quad /4/$$

Основная цель анализа состоит в определении реальных частот и вероятных источников их появления.

Вынужденные колебания ПО. Их источниками могут быть дефекты зубчатых передач, дефекты установки подшипников и разбалансировка роторов ПО. Из анализа кинематической схемы, приведенной на рис.1, следует, что частота наиболее вероятных вынужденных колебаний ПО равна:

$$\text{в приводе ОПО} - \frac{2}{3} f_0; f_0; \frac{1}{3} f_0,$$

$$\text{в приводе ДПО} - \frac{2}{3} f_0; \frac{1}{3} f_0; \frac{1}{5} f_0,$$

где $f_0 = 25 \text{ Гц}$ - частота вращения ОПО. Всем, из приведенных выше, частотам, за исключением оборотных f_0 и $1/5 f_0$, которые в данных измерениях не могут быть зарегистрированы, в экспериментальных спектрах S_0 и S_d может соответствовать согласно правилу /4/ лишь один пик: 1,63 Гц / $f_{опр} = 5 \text{ Гц/}$ или 8,27 Гц / $f_{опр} \approx 25 \text{ Гц/}$. Заметим, что этот пик является наиболее характерным в спектрах S_0 и S_d /см. рис.2,4,6/. Реальную частоту возмущений оценим следующим образом. Из экспериментальной за-

висимости для смещения пика $\sim 1,63$ Гц в спектре S_0 от частоты вращения ПО, полученной при $f_{опр} = f_0/5$,

$$f_3 = 0,148 + 0,3f_{опр}, \text{ Гц,} \quad /5/$$

следует, что частоте $\sim 1,63$ Гц должен соответствовать следующий набор возможных реальных частот: $f_g^* = (n \pm 0,3)f_{опр} \pm 0,148$, $n = 0,1,2,\dots$. Совпадение спектра f_g^* со спектром возможных вынужденных колебаний ПО наблюдается лишь для одной частоты:

$$f_g^* \approx f_g = \frac{2}{3}f_0, \quad (n = 3).$$

Равенство $f_g^* = \frac{2}{3}f_0 \approx 16,3$ Гц выполнялось с погрешностью не хуже 1%. Как уже было отмечено /1,5/, колебания ОПО на этой частоте могут быть связаны с некоторым дефектом поворотного редуктора. Для ДПО возможны два источника: передача колебаний через дефекты привода непосредственно от двигателя /частота вращения ротора двигателя равна 16,3 Гц/ или же от ОПО через опорные подшипники.

Собственные колебания ПО. Отметим, что в спектре ОПО /см. рис.7/ пик 6,52 Гц аналогичен пику 6,85 Гц, зарегистрированному ранее в режиме 50 Гц/1/. Тогда же было показано, что вероятным аналогом 6,85 Гц является частота собственных колебаний ОПО f_c , равная 56,39 Гц. В данном случае, согласно /4/, пику 6,52 Гц должна соответствовать реальная частота 55,42 Гц. Снижение f_c может быть обусловлено уменьшением инерциальных сил, действующих на лопасть, при уменьшении частоты вращения ОПО /расчетная оценка $f_c = 54,5$ Гц/ или изменением жесткости крепления вала ОПО. В отличие от режима 50 Гц, где пик 6,85 Гц был определяющим, в режиме 25 Гц его интенсивность уменьшилась более чем на порядок и почти сравнима с шумом. Из общего решения о поведении одночастотного осциллятора под действием импульсов произвольной формы /в данном случае возбуждение ОПО осуществляется газодинамическими ударами/ следует, что относительное уменьшение мощности резонансных колебаний, зарегистрированное с помощью нижнего датчика, должно составить $\sim 0,06$. Этот результат согласуется с данными спектрального анализа.

Кроме того, в серии резонансных возбуждений ОПО $f_{ом} = \frac{f_p}{m}$ $m = 1,2,\dots$; $f_p = 55,42$ Гц, гармоники 13,86; 9,24; 7,92 Гц / $m = 4,6,7$ / практически совпадают с резонансами ОПО, зарегистрированными при выбеге отражателей /см.разд.3/. Таким образом, пик 6,52 Гц в спектре S_0 вероятнее всего связан с частотой резонансных колебаний ОПО, равной 55,42 Гц.

Из числа других линий в спектрах S_0 и S_d линия 1,8 Гц / $f_{опр} = 25$ Гц/ или $\sim 0,8$ Гц / $f_{опр} = 5$ Гц/ может быть аналогом

собственных колебаний ДПО $f_p = 85 \pm 0,5$ Гц, а пик $\sim 1,63$ Гц / $f_{опр} = 5$ Гц/ или $\sim 8,2$ Гц / $f_{опр} = 25$ Гц/ совпадает с другой частотой собственных колебаний ДПО, равной $33 \pm 0,3$ Гц. Это совпадение может быть и чисто случайным, т.к. линии 1,8 и 8,2 Гц / $f_{опр} = 25$ Гц/ имеют разную зависимость от частоты вращения ОПО: пик 1,8 Гц при постоянном значении f_0 смещается в пределах $1,72 \div 1,89$ Гц, а пик 8,2 Гц строго следует за изменением f_0 .

Ударные компоненты в спектрах ПО. Наличие ударных взаимодействий на ПО, как это следует из теории спектрального анализа, можно идентифицировать по появлению серии колебаний на частотах

$$f_n = n \cdot f_{уд}, \quad n = 1,2,\dots$$

В режиме 25 Гц ударные газодинамические компоненты $f_n = n \cdot f_0$, $n = 1,2,\dots$, "наблюдаются" относительно активной зоны или датчика в одной и той же фазе, поэтому не могут быть зарегистрированы ни в колебаниях мощности, ни в колебаниях ПО. В режиме 5 Гц поле газодинамических возбуждений вращается с частотой ДПО $f_d = f_0/5$, и частоты ударного спектра оказываются кратными частоте относительного вращения ОПО-ДПО: $f_n = n \frac{4}{5} f_0 \approx n \cdot 20$, Гц; $n = 1,2,\dots$. Поэтому при наличии газодинамических ударов в экспериментальном спектре ОПО /при $f_{опр} = 25$ Гц/ должна появиться "замаскированная" ударная серия $f_{эп} = n \frac{f_0}{5}$, $n = 1,2$ /4,89 Гц и 9,8 Гц, см.рис.7/, не наблюдаемая, как и следовало ожидать, в режиме 25 Гц /см. рис.2/.

Однако, так же, как и в режиме 25 Гц, ударная газодинамическая серия кратна частоте следования импульсов мощности $f_d = \frac{f_0}{5}$, поэтому в спектрах ОПО и ДПО при $f_{опр} = f_d$ эти частоты отсутствуют /см.рис.4/.

Суммарный вклад интенсивности ударных составляющих в спектре S_0 в полную дисперсию колебаний ОПО $\eta_{уд}^2 = \frac{\sigma_{уд}^2}{\sigma_x^2}$, где $\sigma_{уд}^2 = \sigma_{4,89}^2 + \sigma_{9,8}^2$, зависит от средней мощности реактора следующим образом:

$$\eta_{уд}^2 = \begin{cases} 37 \pm 7\%, & W = 0 \text{ МВт} \\ 30 \pm 9\%, & W = 1 \text{ МВт} \\ 58 \pm 10\%, & W = 2 \text{ МВт.} \end{cases} \quad /5/$$

Рост $\eta_{уд}^2$ при изменении мощности от 1 до 2 МВт, по-видимому, связан с механическими, а не газодинамическими эффектами, по-

сколько аэродинамические условия обтекания лопасти ОПО при изменении W практически не меняются /деформации кожуха и изменение зазора между ОПО и кожухом находятся в пределах $\sim 0,3$ мм/. Тогда из /5/ следует, что минимальный вклад чисто механических ударных воздействий на ОПО равен $/24 \pm 10\%$, а газодинамических $\sim /34 \pm 10\%$. Отметим, что эти компоненты вносят нулевой вклад в эффекты реактивности.

Абсолютные значения отклонений ПО. На протяжении всего периода энергетического пуска поперечные колебания отражателей были значительно меньше допустимых*. Средние отклонения ОПО составили:

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_x = 3,9^{+2,0}_{-0,8} \text{ мкм} \\ \bar{\Delta X}_m = 0,032 \pm 0,004 \text{ мм} \end{cases} \quad \text{режим 25 Гц}$$

$$\begin{cases} \sigma_x = 6,5^{+4,5}_{-2,5} \text{ мкм} \\ \Delta X_m = 0,057^{+0,03}_{-0,02} \text{ мм} \end{cases} \quad \text{режим 5 Гц.}$$

Для ДПО в режиме 5 Гц - $\bar{\sigma}_x = 0,035 \pm 0,015$ мм и $\bar{\Delta X}_m = 0,24^{+0,27}_{-0,16}$ мм. Возрастание колебаний ОПО при переходе из режима 25 Гц в режим 5 Гц в среднем в $1,66^{+1,9}_{-1,0}$ раза для σ_x

и в $1,8^{+1,3}_{-0,7}$ раза для ΔX_m обусловлено появлением в режиме 5 Гц вращающегося газодинамического поля и более сильным взаимным влиянием вибраций отражателей. За счет ударных воздействий величина σ_x увеличивается только в 1,19 раза /при средней оценке вклада ударных составляющих в спектре S_0 , равной, согласно /5/, $\sim 41\%$.

Как видно из табл.1, вибрации ОПО в режиме 25 Гц слабо зависят от мощности, однако при $W = 1,5$ МВт разброс σ_x и ΔX_m резко увеличивается, например, для средней части лопасти возрастает с $\sim 2\%$ до $\sim 45\%$. При $W = 2$ МВт колебания ПО хотя и становятся более устойчивыми, но возрастают в среднем на $\sim 10\%$. Из анализа спектров S_0 следует, что на мощности 2 МВт увеличение вибраций ПО обусловлено ростом амплитуды колебаний на частоте $\sim 16,3$ Гц / $f_{\text{экс}} \approx 8,2$ Гц/, что вероятнее всего вызвано тепловыми эффектами в поворотном редукторе.

* Допустимы следующие отклонения: $\pm 0,1$ мм /ОПО/, $\pm 0,3$ мм /ДПО/.

5. ЭФФЕКТЫ РЕАКТИВНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВИБРАЦИЯМИ ПО

В качестве оценок приняты стандартные отклонения реактивности σ_{ϵ_i} , обусловленные i -м процессом, $i = X_0, X_d, \varphi$. Для получения σ_{ϵ_i} использовались известные соотношения динамики реактора с параметрами: $\alpha_{\text{ДПО}} = 4,9 \cdot 10^{-5}$ град $^{-2}$ - параболический коэффициент реактивности ДПО,

$$\left. \frac{dK}{dX} \right|_{\text{ОПО}} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-1} \quad \text{и} \quad \left. \frac{dK}{dX} \right|_{\text{ДПО}} \approx 10^{-4} \text{ мм}^{-1} - \text{изменение реактивности при осевом сдвиге отражателей /данные физического пуска/.$$

Полные шумы реактивности σ_{ϵ_Σ} определены в виде $\sigma_{\epsilon_\Sigma} = \left[\sum_i \sigma_{\epsilon_i}^2 \right]^{1/2}$, т.е. в предположении о независимости отдельных источников шумов. Все сведения о σ_{ϵ_i} и σ_{ϵ_Σ} приведены в табл.5.

Таблица 5

Усредненные оценки парциальных $/\sigma_{\epsilon_0}, \sigma_{\epsilon_d}, \sigma_{\epsilon_\varphi}/$ и полных $/\sigma_{\epsilon_\Sigma}/$ эффектов реактивности, обусловленных поперечными и крутильными колебаниями отражателей /при оценке σ_{ϵ_0} и σ_{ϵ_d} использовались показания нижних емкостных Датчиков/

Режим работы реактора	Диапазон изменения мощности, МВт	$\sigma_{\epsilon_0}, 10^{-6} \frac{\Delta K}{K}$	$\sigma_{\epsilon_d}, 10^{-6} \frac{\Delta K}{K}$	$\sigma_{\epsilon_\varphi}, 10^{-6} \frac{\Delta K}{K}$	$\sigma_{\epsilon_\Sigma}, 10^{-6} \frac{\Delta K}{K}$
25 I/c	0+0,4	1,6±0,25	-	-	~1,6±0,25
	1,5±2,0	1,9±0,80	-	-	~1,9±0,80
	~0 + 2,0	1,8±0,40	-	-	~1,8±0,4
5 I/c*	~0 + 0,4	2,8±0,5	2,5±0,7	~0,05	3,7±0,8
	1,0±2,0	2,4±1,4	3,9±2,0	0,06±0,02	4,6±2,4
	~0 ±2,0	2,9±1,1	3,5±1,5	0,07±0,06	4,5±2,7

* В оценки не вошли данные 1981 г. при $W \leq 0,3$ кВт.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Эксперименты показали, что в период энергетического пуска ИБР-2 неконтролируемые вибрации ПО и вызываемые ими случайные эффекты реактивности находились на уровне, значительно

меньшем допустимого. Средние поперечные отклонения ОПО в режиме 25 Гц составили: $\sigma_x = 3,9$ мкм и $\Delta X_m = 0,032$ мм, а при переходе в режим 5 Гц увеличились соответственно в 1,66 / $\sigma_x = 6,5$ мкм/ и 1,8 раза / $\Delta X_m = 0,057$ мм/. Средние колебания ДПО в режиме 5 Гц равны: $\sigma_x = 0,035$ мм и $\Delta X_m = 0,24$ мм.

2. В режиме 25 Гц /67±5%/ от полной интенсивности эффектов реактивности, обусловленных поперечными вибрациями ПО, связаны с двумя компонентами на частотах 1,8 и 8,2 Гц, а 33% вызваны широкополосными случайными вибрациями отражателей.

3. В режиме 5 Гц вибрации ПО существенно зависят от режима вращения ПО /"мягкий" или "жесткий"/ и от работы системы стабилизации скорости ОПО. Отключение системы стабилизации скорости может привести к росту отклонений ОПО в 1,9, а ДПО — в 1,6 раза. Спектральный состав колебаний ОПО, вызывающий неконтролируемые флуктуации мощности, неустойчив, содержит значительную шумовую компоненту /до ~ 80% по интенсивности/ и основную детерминированную компоненту на частоте ~ 1,63 Гц.

Для эффектов реактивности, обусловленных колебаниями ДПО, характерны две частоты: ~ 0,8 и ~ 1,63 Гц. При $W \geq 1$ МВт ДПО практически полностью вибрирует на одной частоте, равной 1,63 Гц /93% от σ_x^2 /.

4. Наиболее вероятный источник основных возмущений и неустойчивости колебаний ПО связан с дефектами поворотного редуктора и с его термической деформацией при изменении мощности.

5. Суммарные эффекты реактивности, обусловленные вибрациями ПО, не превышают /4,5±2,7/·10⁻⁶ ΔК/К.

6. Снижение частоты вращения ОПО с 50 до 25 Гц, осуществленное перед началом энергетического пуска, привело к снижению поперечных вибраций ОПО в 1,5, а ДПО — в 5÷7 раз.

7. В целом конструкция модулятора реактивности с ДПО в виде "трезубца" полностью обеспечивает стабильную работу реактора на мощности 2 МВт.

После энергетического пуска в конструкцию МР были введены дополнительные усовершенствования /например, введена новая система стабилизации оборотов ОПО/. Это изменило в лучшую сторону картину колебаний, особенно фазовых, и периодов вращения ПО. Однако параметры основного источника неконтролируемых флуктуаций реактивности /поперечных колебаний ПО/ изменились незначительно.

В заключение автор выражает глубокую признательность всему персоналу службы управления реактора, операторам измерительного центра ЛНФ, а также В.В.Мелихову, А.Д.Рогову, Л.В.Едунову, А.С.Савватееву за помощь в проведении измерений, Е.П.Шабалину за обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Едунов Л.В. и др. ОИЯИ, 13-80-628, Дубна, 1980.
2. Вагов В.А. и др. ОИЯИ, Р13-82-533, Дубна, 1982.
3. Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д. ОИЯИ, Р13-84-73, Дубна, 1984.
4. Пепельшев Ю.Н., Хан Пхун Ги. ОИЯИ, 13-85-234, Дубна, 1985.
5. Ломидзе В.Л. и др. ОИЯИ, Р13-121-95, Дубна, 1979.
- 6: Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний, М.: Машиностроение, 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 июля 1987 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р.55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р.00 к.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р.50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р.30 к.
D1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р.50 к.
D10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983.	3 р.50 к.
D17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р.75 к.
D11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.00 к.
D13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р.80 к.
D4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р.75 к.
D3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986.	4 р.50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. /2 тома/	13 р.50 к.
D1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. /2 тома/	7 р.35 к.
D9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. /2 тома/	13 р.45 к.
D7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986	7 р.10 к.
D2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа-86". Дубна, 1986	4 р.45 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

Пепёлышев Ю.Н.

13-87-564

Исследование колебаний подвижных отражателей /энергетический пуск реактора ИБР-2/

Приводятся результаты экспериментального исследования случайных колебаний подвижных отражателей /ПО/ реактора ИБР-2. Анализируется влияние структуры и уровня осевых и фазовых колебаний ПО, а также периодов вращения отражателей на неконтролируемые флуктуации внешней реактивности. При обработке экспериментальных данных использовались методы статистического анализа стационарных двухкомпонентных временных рядов. Показано, что в период энергетического пуска реактора ИБР-2 /1980-1984 гг./ неконтролируемые флуктуации реактивности, обусловленные вибрациями ПО, были незначительными $4,5 \pm 2,7 \cdot 10^{-6} \Delta K/K$, а конструкция модулятора реактивности с ДПО в виде "трезубца" полностью обеспечивает стабильную работу реактора в диапазоне средней мощности от 0 до 2 МВт.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Pepolyshchev Yu.N.

13-87-564

The Study of Moving Reflector Vibrations (Energy Start-Up of the IBR-2 Reactor)

The results are given on the experimental study of occasional vibrations of the IBR-2 moving reflectors. The influence of the spectral structure, the level of axial and phase oscillations of the moving reflector and periods of reflector rotation is analysed. At experimental data handling the methods were used of the statistic analysis of the stationary bicomponental time series. It is shown that at the period of the IBR-2 energy start-up the uncontrolled reactivity fluctuations due to the moving reflector vibrations were rather insignificant $4,5 \pm 2,7 \cdot 10^{-6} \Delta K/K$. The construction of the reactivity modulator with the moving reflector as "trident" provides the regular reactor work at the mean power range of 0 to 2 MeV.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987