

сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

123 / 2-81

12/1-81

13-80-628

Л.В.Едунов, Нго Куанг Зуй, Ю.Н.Пепельшев,  
Е.П.Шабалин

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
МОДУЛЯТОРА РЕАКТИВНОСТИ РЕАКТОРА ИБР-2

1980

## ВВЕДЕНИЕ

Во время физического пуска реактора ИБР-2, который был проведен в период с ноября 1977 г. по февраль 1978 г., выяснилось, что обычный вариант подвижного отражателя не обеспечивает проектных характеристик реактора из-за малого значения параболического коэффициента реактивности<sup>1/</sup>. Тогда же были изучены физические характеристики нового модулятора реактивности с дополнительным подвижным отражателем /ДПО/ в виде трезубца<sup>2/</sup>. Оказалось, что этот модулятор имеет характеристики, близкие к проектным. Однако были опасения, что динамика такого подвижного отражателя будет хуже прежней - с ДПО в виде диска<sup>3/</sup>.

Данная работа включает результаты измерений осевых и фазовых колебаний роторов подвижного отражателя с ДПО в виде трезубца, проведенные на стенде ПО в зале реактора ИБР-2 в октябре 1979 года.

### 1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Испытуемая машина представляла собой полную сборку подвижного отражателя без штатной биологической защиты, установленную на массивное бетонное основание. Измерения проводились с помощью емкостных датчиков положения ОПО и ДПО, расположенных попарно на соответствующих сторонах кожуха подвижного отражателя. При анализе собственных частот колебаний дополнительно использовались датчики ускорения, устанавливаемые непосредственно на лопастях подвижных отражателей. Форма подвижных отражателей и расположение датчиков показаны на рис. 1.

Сигналы с датчиков после предварительной обработки регистрировались на запоминающем или шлейфовом осциллографах. Начало регистрации совпадало с временем прохождения ОПО или ДПО через соответствующие датчики. При исследовании ОПО использовалась измерительная система на базе мини-ЭВМ PDP-11/20 с записью информации на магнитную ленту с последующей обработкой на ЭВМ CDC-6500. В этом случае на PDP-11/20 регистрировалась дискретная выборка последовательных событий длиной 10240, по которой проводился статистический анализ. Частота опроса соот-

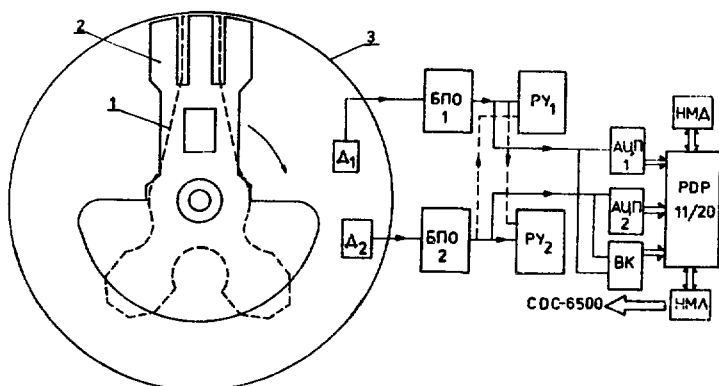


Рис.1. Принципиальная блок-схема измерения осевых вибраций модулятора реактивности. 1 - основной подвижный отражатель /ОПО/, 2 - дополнительный подвижный отражатель /ДПО/, 3 - кожух,  $D_1$ ,  $D_2$  - емкостные датчики ОПО /ДПО/, БПО1 /2/ - блоки предварительной обработки сигналов с датчиков, РУ1/2/ - регистрирующие устройства, АЦП1/2/ - аналого-цифровые преобразователи, ВК - временной кодировщик, НМД /НМЛ/ - накопитель на магнитном диске /ленте/.

ветствовала частоте вращения ОПО. Подробное описание программы обработки приведено в работе [3].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проводились при частоте вращения ОПО, равной 50 Гц как с вращающимся ДПО ( $f_{ДПО} = 0,1 f_{ОПО}$ ), так и с заторможенным /  $f_{ДПО} = 0$  Гц/. Отдельно исследовались процессы вы бега отражателей и определялись собственные частоты основных форм колебаний.

### 2.1. Колебания ДПО

При заторможенном ДПО регистрировался непрерывный процесс колебаний отдельных зубьев. На рис.2 показана форма колебаний лопасти ДПО относительно емкостного датчика. Видимые на рисун-

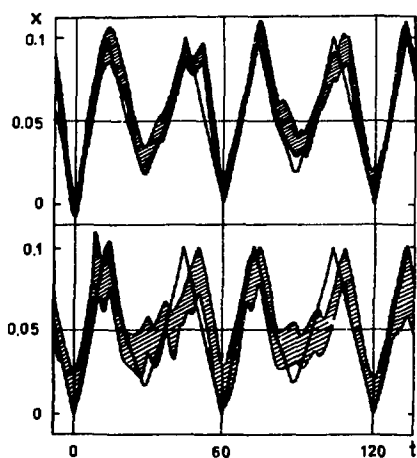


Рис.2. Зависимость осевых смещений  $X$  /мм/ заторможенного ДПО /режим 50 Гц/ от времени  $t$  /мс/. Начало отсчета взято произвольным образом. Приведены наиболее отличающиеся друг от друга экспериментальные кривые [заштрихованная область/, — - расчет по формуле /6/.

ке пики, повторяющиеся с частотой 16,5 Гц, проявляются во всех случаях, независимо от повторного запуска и степени прогрева отражателя, однако детальная картина колебаний от измерения к измерению менялась. /На рисунке приведены две наиболее отличающиеся друг от друга формы колебаний/.

Для характеристики абсолютных значений осевых отклонений ДПО использовались две величины  $\Delta X_{мс}$  и  $\Delta X_{мп}$ . Первая из них,  $\Delta X_{мс}$ , представляет собой полный размах случайных и высокочастотных отклонений ДПО, наблюдаемых в фиксированной фазе стационарных колебаний, а величина  $\Delta X_{мп}$  - максимальный размах колебаний. В режиме 5 Гц в качестве величины  $\Delta X_{мп}$  взят максимальный размах отклонений ДПО, наблюдаемый относительно датчика /или активной зоны/. Значения  $\Delta X_{мс}$  и  $\Delta X_{мп}$  определенные по совокупности отдельных измерений /50 осциллограмм/, представлены в табл.1. Время измерения быстрых колебаний не менее 15 с, а полных - 10 мин.

При исследовании спектрального состава колебаний заторможенного ДПО непрерывная картина колебаний, зарегистрированная на осциллограммах, преобразовывалась в дискретную форму с последующей обработкой на ЭВМ. При этом спектральная плотность мощности вычислялась в виде

$$\Phi_n = \Phi(f_n) = \frac{T}{2} \left[ \phi_0 + \sum_{i=1}^{m-1} \phi_i \cos \frac{\pi i n}{m} + (-1)^n \phi_m \right],$$

где  $f_n = \frac{n}{m} \cdot f_c$  - текущее значение частоты,  $f_c = \frac{1}{2T}$  - критическая частота Найквиста,  $T$  - период отроса,  $n=1,2,\dots,m$ ,

Таблица 1

Максимальный размах случайных и высокочастотных ( $\Delta X_{мс}$ ) и полных ( $\Delta X_{мп}$ ) осевых колебаний ДПО при некоторых значениях частоты вращения ОПО и фазы совпадения ОПО-ДПО  $\phi^a$ )

$n$ /об/мин/	$\phi$ град	$\Delta X_{мс}$ /мм/	$\Delta X_{мп}$ /мм/	Примечания
<u>Режим 50 Гц</u>				
2960	-13÷+25	0,044+0,004	0,11+0,007	Усреднение по $\phi$ .
2500	-13	-	0,35	Резонансы ДПО при
1950	-	-	0,38*	выбеге ОПО.
1700	-	-	0,18	* - частота
1250	-	-	0,08	колебаний ДПО $f_0$
990	-	-	0,24*	равна 33 Гц; для
650	-	-	0,16*	остальных значе- ний $f_0 = 85$ Гц
<u>Режим 5 Гц</u>				
2960	-20÷+14	-	0,12+0,009	Усреднение по $\phi$ .
2950	-20	-	0,16	С проскальзыва- нием электромаг- нитной муфты
2950	-20÷+20	-	0,26	Накопление при изменении фазы
2960÷ 2600	-4	-	0,56	Выбег ОПО-ДПО

<sup>a)</sup> Фаза совпадения  $\phi$  характеризует место встречи ОПО и ДПО;  $\phi = 0$  при горизонтальном положении лопастей во время встречи; "знак "-" приписывается направлению, обратному направлению вращения /т.е. против часовой стрелки со стороны привода/.

$$\phi_k = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} (X_i - \bar{X})(X_{i+k} - \bar{X}) - \text{авткорреляционная функция,}$$

$$X_i = X(iT), \quad X_{i+k} = X(iT + kT) - \text{текущее значение зарегистрированного сигнала } k=0,1,\dots, m, \quad N - \text{число дискретных значений } X, \quad \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i - \text{среднее значение } X.$$

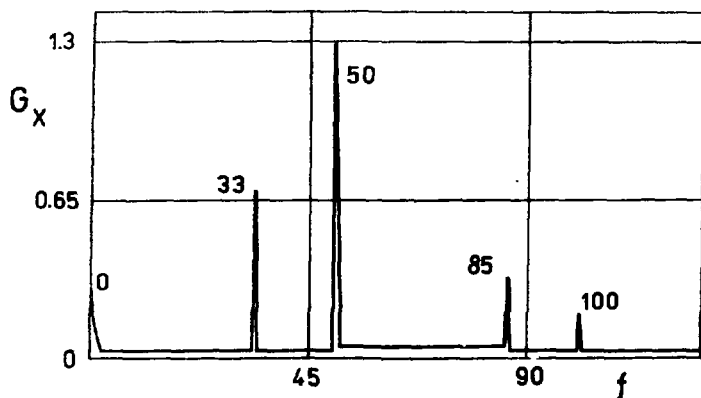


Рис.3. Спектральная плотность мощности  $G_x$  осевых колебаний заторможенного ДПО /крайний "зуб"/,  $f$  - частота /Гц/.

Конечным результатом являлась сглаженная спектральная плотность

$$G_1 = (\Phi_1 + \Phi_2) / 2$$

$$G_m = (\Phi_{m-1} + \Phi_m) / 2$$

$$G_i = (\Phi_{i-1} + 2\Phi_i + \Phi_{i+1}) / 4.$$

На рис.3 приведен участок спектра мощности колебаний первого /по направлению вращения/ "зуба" заторможенного ДПО с наиболее интенсивными линиями, характерными для колебаний всех "зубьев" /кроме среднего, в спектре колебаний которого отсутствует линия 85 Гц/. В режиме 5 Гц /частота вращения ДПО/ подробные измерения спектрального состава колебаний ДПО не проводились. Для колебаний отдельных зубьев отмечается синфазность колебаний крайних и несколько меньший размах колебаний среднего зуба. Максимальное отличие в размахах колебаний крайних и среднего зубьев составило 0,07 мм. В измерениях было замечено, что плоскость зубьев ДПО повернута относительно поверхности кожуха. Конец третьего зуба /отсчет против направления вращения/ смещен относительно начала первого на 0,2 мм в сторону от активной зоны.

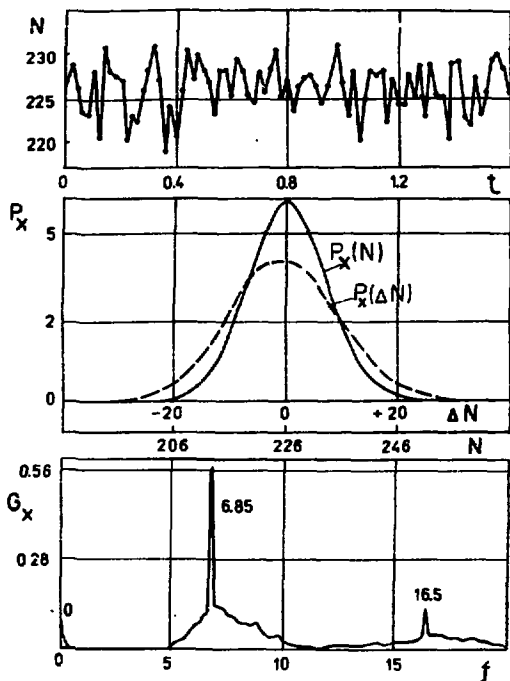


Рис. 4. Режим 50 Гц. Колебания ОПО. Осевые смещения  $N$  лопасти ОПО /  $N$  - номер канала АЦП, 1 канал АЦП соответствует  $9,68 \cdot 10^{-4}$  мм смещения ОПО/ в зависимости от времени  $t$  /с/. /Начало отсчета  $t$  взято произвольным образом/. Плотности распределения быстрых  $P_x(\Delta N)$  и полных колебаний  $P_x(N)$  /%/канал/. Спектральная плотность мощности  $G_x$  осевых колебаний,  $f$  - частота /Гц/.

### 3.2. Колебания ОПО

Колебания ОПО измерялись в режимах 5 и 50 Гц как с жестким зацеплением электромагнитной муфты, так и с проскальзыванием, при холодной и разогретой машине, а также для разных фаз встречи ОПО-ДПО. На рис. 4, 5 для примера показаны некоторые характеристики колебаний ОПО, зарегистрированные на ЭВМ в режимах 5 и 50 Гц. На этих рисунках приведены плотности распределения быстрых колебаний  $P(X_{i+1} - X_i) / X_{i+1}$  - текущее значение осевого смещения ОПО/, наблюдаемые относительно датчика /или активной зоны/ в течение одного оборота ОПО, а также плотности распределения  $P(X)$ . Полный размах  $\Delta X_m$  в распределении  $P(X)$  для разных  $\phi$  дополнительно определялся из анализа осциллограмм. В табл. 2 приводятся стандартные отклонения  $\sigma_x$  и максимальные отклонения  $\Delta X_m = X_{max} - X_{min}$ , а также максимальные быстрые отклонения  $\Delta X_{m\delta}$ .

Указанные в табл. 2 значения отклонений являются максимальными для всех измерений, прове-

денных в различных режимах работы отражателя, и отличаются от минимальных не более, чем на 0,009 мм /кроме  $\sigma_x$ , где отличие укладывалось в ошибку измерения, составляющую 0,001 мм/. Сред-

Таблица 2

Стандартное отклонение  $\sigma_x$  и максимальный размах быстрых  $\Delta X_{m\delta}$  и полных  $\Delta X_m$  отклонений ОПО относительно активной зоны при различных режимах работы отражателя

Режим работы отражателя и число оборотов ОПО /об/мин/	Фаза встречи ОПО и ДПО /град/	$\sigma_x$ /мм/	$\Delta X_m$ /мм/	$\pm \Delta X_{m\delta}$ /мм/
$f = 5$ Гц $n = 2960$	-26,5	0,01	0,076	0,057
$f = 5$ Гц $n = 2960$	0÷360	-	0,055*	
$f = 5$ Гц $n = 2950 \div 1400$ Выбег ОПО	-	0,037 0,14**	0,2 0,69**	
$f = 50$ Гц $n = 2964 \div 2973$	15,7÷180	0,007	0,056	0,038

\* Из анализа осциллограмм. В этом случае время отдельного измерения для фиксированного  $\phi$  составляло ~20 с. Остальные данные получены при времени измерения ~3,3 мин.

\*\* Для датчика Д1 /см. рис.1/.

нее по распределению  $P(X)$  положение лопасти ОПО  $\bar{X}$  относительно кожуха меняется в зависимости от режима работы, повторного запуска и степени прогрева отражателя. Максимальное изменение величины  $\bar{X}$ , зарегистрированное в измерениях, составило 0,2 мм.

В режиме 5 Гц были измерены колебания, синфазные с частотой вращения ОПО, и поэтому "невидимые" для отдельного датчика \*. Для этого были использованы данные по отклонениям  $\Delta X$  лопасти в резонансе, зарегистрированном при выбеге ОПО с помощью двух

\* Для синфазных колебаний лопасть ОПО проходит мимо датчика в одной и той же фазе, поэтому его показания неизменны от оборота к обороту ОПО.



датчиков, разнесенных на известное угловое расстояние  $\Delta\phi = 40^\circ$ . В этом случае наблюдаемые отклонения  $\Delta X_{\parallel} = 0,51$  мм и  $\Delta X_{\perp} = 0,17$  мм связаны с фазой колебания  $\phi_1$  относительно одного из датчиков соотношениями

$$\Delta X_1 = a \cdot \sin \phi_1$$

$$\Delta X_2 = a \cdot \sin (\phi_1 + \Delta \phi).$$

/1/

Полученная из /1/ амплитуда синфазных колебаний в резонансе  $a \approx 0,6$  мм. Резонансная частота в этих измерениях не могла быть определена.

### 2.3. Рассинхронизация ОПО-ДПО во вращении

Угол рассинхронизации  $\Delta\phi$  определялся по измеренной разности между временем появления сигналов с датчиков ОПО и ДПО, угловое расстояние между которыми фиксировано. Измеренная плотность распределения величины  $\Delta\phi$  практически совпадает с гауссовой со стандартным отклонением  $\sigma_\phi = 0,19^\circ$ . Размах быстрых  $\Delta X_{\text{мб}}$  и полных колебаний  $\Delta\phi_{\text{мп}}$  за время измерения, равное 33 мин, составил соответственно  $0,78^\circ$  и  $1,3^\circ$ . Практически как спектральный состав, так и абсолютное значение величины  $\Delta\phi$  совпадают с данными по угловым колебаниям отражателей в дисковом варианте ДПО /1/. Отличие проявилось в сдвиге резонансных пиков в среднем на  $+0,1$  Гц, что, по-видимому, связано с изменением геометрии и массы ДПО.

### 2.4. Оценки влияния вибраций отражателей на флуктуации мощности реактора ИБР-2

Приведенные выше экспериментальные данные позволяют оценить относительную величину флуктуаций энергии импульсов мощности, обусловленных осевыми колебаниями ОПО -  $\eta_{\text{wxi}}$  и ДПО -  $\eta_{\text{wxD}}$ , а также крутильными колебаниями отражателей  $\eta_{\text{w}\phi}$ . Для величины  $\eta_{\text{wxi}} = \frac{\sigma_{\text{wi}}}{\bar{W}}$ , где  $\sigma_{\text{wi}}^2$  - дисперсия энергии импульсов и соответственно средняя мощность, используем известные соотношения:

$$\eta_{\text{wxi}} = \frac{4B-1}{2\epsilon_{\text{mo}}} \cdot \frac{dK}{dX} \sigma_x, \quad /2/$$

$$\eta_{\text{w}\phi} = \frac{4B-1}{2\epsilon_{\text{mo}}} \cdot a_{\text{ДПО}} \cdot \sigma_\phi^2, \quad /3/$$

где  $B = \epsilon^{3/2} / (\alpha_{\text{ОПО}}^{1/2} \cdot \omega r)$  - безразмерный параметр /4/,  $\epsilon_{\text{мо}} = 1,32 \cdot 10^{-3}$  /в режиме 50 Гц/ и  $1,93 \cdot 10^{-3}$  /в режиме 5 Гц/ - расчетная равновесная импульсная надкритичность,  $\omega$  - угловая скорость ОПО. Для других величин /кроме  $\sigma_x$ ,  $\sigma_\phi$  /, входящих в выражения /2,3,4/, используем их значения, полученные во время физического пуска ИБР-2  $\%_{\text{с}}/$ :  $dK/dX = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^{-1}$  - изменение реактивности при осевом сдвиге ОПО,  $\alpha_{\text{ОПО}} = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-2}$  - параболический коэффициент реактивности ОПО,  $\alpha_{\text{ДПО}} = 0,65 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-2}$ ,  $r = 60 \text{ нс}$  - ожидаемое значение среднего времени жизни нейтронов в активной зоне. В качестве  $\sigma_x^2$  для ОПО и  $\sigma_\phi^2$  взяты дисперсии осевых и фазовых смещений, а для ДПО величина  $\Delta X_{\text{мп}}/2$ . Отсюда имеем:

$$\eta_{\text{wxo}} = 1,1\%, \quad \eta_{\text{wxD}} = 0,4\% \text{ /в режиме 50 Гц/ и}$$

$$\eta_{\text{wxo}} = 2\%, \quad \eta_{\text{wxD}} = 0,6\%, \quad \eta_{\text{w\phi}} = 1,2\% \text{ /в режиме 5 Гц/ .}$$

Оценки максимальных флуктуаций мощности для

$$\sigma_x = \Delta X_{\text{мп}}/2 \quad \text{и} \quad \sigma_\phi = \Delta \phi_{\text{мп}}/2:$$

$$\eta_{\text{w xom}} = 5\%, \quad \eta_{\text{wxDm}} = 0,4\% \text{ /в режиме 50 Гц/ и}$$

$$\eta_{\text{w xom}} = 8\%, \quad \eta_{\text{wxDm}} = 0,6\%, \quad \eta_{\text{w\phi m}} = 12\% \text{ /для 5 Гц/ .}$$

Суммарные флуктуации в режимах 50 и 5 Гц составляют  $1,5 \div 6\%$  и  $3 \div 15\%$  соответственно.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ОПО И ДПО

Для изучения собственных частот, определяющих резонансные явления в колебаниях отражателей, использовались два метода: возбуждение колебаний ударом в статическом состоянии ОПО и ДПО и возбуждение газодинамических ударов при выбеге отражателей. В последнем случае в колебаниях ДПО /как в режиме 50 Гц, так и 5 Гц/ выявляются мощные резонансы с размахом до 0,38 мм при частотах  $f_{1\text{ДПО}} = 33 \text{ Гц}$  и  $f_{2\text{ДПО}} = 85 \text{ Гц/см. табл.1/}$ . Расчетная оценка первой собственной частоты колебаний лопасти ДПО, представленной в виде жестко закрепленной балки, составила 41 Гц. Из высших форм колебаний ДПО, определенных в статическом состоянии отражателя с помощью датчиков ускорения, выделяется частота  $f_{3\text{ДПО}} = 497 \text{ Гц}$  с  $r = 0,66 \text{ с/г}$  - время затухания/. Для колебаний среднего зуба характерна частота 150 Гц с  $r = 8 \text{ с}$ , по расчетным оценкам составляющая 200 Гц. Для невращающегося ОПО, помещенного на отдельную стойку, зарегистрирована частота  $f_{1\text{ОПО}} = 89,3 \text{ Гц}$  с  $r = 3,4 \text{ с}$ , а также одна из высших частот  $f_{2\text{ОПО}} = 384 \text{ Гц}$  с  $r = 0,75 \text{ с}$ . Расчетное значение первой статической частоты изгибных колебаний лопасти ОПО в предположении, что лопасть жестко закреплена на валу, равна 71 Гц.

При вращении отражателей с относительной частотой  $f_{im} = f_1/m$ , где  $f_i$  - собственная  $i$ -ая частота ОПО или ДПО,  $m=1,2,\dots$ , должно наблюдаться резонансное усиление колебаний, что и было замечено для ДПО /см. табл.1/. Однако для корректного выбора частоты вращения отражателей вне  $f_{im}$  необходимо учесть, что значения  $f_j$ , связанные с колебаниями валов, при разгоне отражателей будут больше, чем при выбеге, за счет изменения жесткости в системе передачи.

#### 4. АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ЭСБВЫХ КОЛЕБАНИЙ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Задача анализа - выделить составляющие возмущающей силы, определить их источники и характер воздействия на отражатели. В табл.3 представлены основные линии экспериментальных спектров мощности колебаний отражателей, а также указаны значения критической частоты  $f_c$ , ограничивающей сверху область определения  $G_x(f)$ . Так как  $G_x(f)$  представляет собой спектр серии дискретных значений положения отражателя  $X_K(K \Delta t) / \Delta t = \frac{1}{2f_c}$  - промежуток времени между соседними значениями  $K=1, \dots, N$ , то можно показать, что все частоты реального непрерывного процесса в диапазоне  $1/(\Delta t \cdot N) < f < \infty$  будут представлены в области определения функции  $G_x(f)$   $0 \leq f \leq f_c$ . В случае, если реальная частота  $f > f_c$ , то в спектре  $G_x(f)$  ей соответствует замаскированная частота  $f_m$ , связанная с  $f$  и  $f_c$  соотношением

$$f = 2nf_c \pm f_m, \quad \text{где } n=1,2,\dots \quad /5/$$

При  $n=0$  спектр  $G_x(f)$  представлен реальными частотами. Из табл.3 видно, что в режимах 50 и 5 Гц в колебаниях ОПО присутствуют частоты 6,85 и 16,5 Гц. Частота 16,5 Гц наблюдалась в колебаниях ОПО во время физического пуска ИБР-2<sup>3</sup> и была интерпретирована как реальная частота, связанная с перекосом ведущей шестерни на валу ОПО в поворотном редукторе. Поскольку в данном варианте отражателя конструкция поворотного редуктора осталась неизменной, частоту 16,5 Гц можно связать именно с этим дефектом редуктора. С другой стороны, частота 16,5 Гц является замаскированной для 33 Гц /  $n=1$  в /5//, зарегистрированной в спектре колебаний ДПО как собственная частота /см. раздел 3/. Поскольку вибрации ДПО могут передаваться на вал ОПО только через массивную станину, в то время как с ведущей шестерни они передаются непосредственно на вал, то можно считать, что пик 16,5 Гц, в основном, обусловлен дефектами в системе передачи поворотного редуктора.

Таблица 3

Основные характеристики спектров колебаний ОПО и ДПО

Режим работы отработавшего	Косиблизкий элемент и критическая частота измеренного спектра	Линия в экспериментальном спектре колебаний (Гц)	Предполагаемая реальная линия (Гц)	Причина появления
50 Гц	ОПО, 24,75 Гц	0 6,85 16,5	50 56,35(106) 16,5	Вынужденные колебания под действием газодинамических ударов при встречах ОПО и ДПО. Собственные колебания лопасти ОПО. Возмущения в поворотном редукторе на I-й шестерне вала ОПО.
50 Гц	ДПО 125 Гц	0,50,100 33 85	50 33 85	Вынужденные колебания под действием газодинамических ударов. Собственные колебания ДПО, возбуждаемые газодинамическими ударами.
50 Гц	Кожух со стороны ОПО, 245 Гц	50,100,150, 200 П * 25	50 25	Газодинамическое воздействие ОПО. Механические удары в поворотном редукторе.
50 Гц	Кожух со стороны ДПО, 245 Гц	100,150,200	50	Газодинамическое воздействие ОПО
5 Гц	ОПО, 24,75 Гц	4,95; 9,9;14,85; 19,8 6,85 16,5	44,55 4,95 56,35(106) 16,5	Газодинамические удары. Колебания вала ДПО. Собственные колебания лопасти ОПО. Возмущения в поворотном редукторе на валу ОПО.

Второй пик, по-видимому, является замаскированной частотой, соответствующей собственным колебаниям ОПО  $f_0$ . Наиболее вероятное значение  $f_0$  составляет ~ 56 Гц при  $n=1$  в /5/ или ~106 Гц при  $n=2$ . Частоты 43 Гц при  $n=1$  и 92 Гц при  $n=2$  опущены, поскольку в режиме 5 Гц наблюдались бы условия, близкие к резонансу, который экспериментально не наблюдался. Ограничение на значение  $n$  в /5/ связано с тем, что при  $n \geq 3$  значение  $f_0$  значительно превышает зарегистрированную статическую частоту собственных колебаний ОПО, помещенного на отдельную стойку, 89,3 Гц и расчетную оценку, равную ~71 Гц. Реальная частота  $f_0$  при вращающемся ОПО с учетом жесткости крепления ОПО в реальной конструкции и изменения жесткости за счет действия инерциальных сил может отличаться от указанных значений /71 Гц, 89,3 Гц/ не более, чем на 50%.

В спектре колебаний ДПО линии 33 и 85 Гц однозначно определены как собственные частоты колебаний ДПО /см. табл.1/. Линию 33 Гц, наблюдаемую в спектрах колебаний всех "зубьев", можно связать с частотой изгибных колебаний лопасти ДПО /расчетная верхняя оценка 41 Гц/, но не вала, собственная частота которого для точечной массы ДПО по расчету составляет ~700 Гц. Вторую собственную частоту ДПО 85 Гц, если учесть, что в колебаниях центральной части ДПО она отсутствует, можно интерпретировать как частоту крутильных колебаний лопасти /расчетное значение 100 Гц/.

В режиме 50 Гц в спектре мощности ОПО замечен пик при частоте  $f = 0$  Гц, который может быть только замаскированным пиком для всех частот, кратных 50 Гц /нижняя частота реального спектра отлична от нуля/. Для спектра ДПО / $f_c = 125$  Гц, рис.3/ также замечен пик при нулевой частоте и дополнительно - пики на частотах 50 и 100 Гц. Сравнивая эти два спектра, нетрудно увидеть, что в обоих спектрах наблюдается серия частот, кратных частоте вращения ОПО.

Если теперь обратиться к спектру ОПО в режиме 5 Гц /рис.5/, то зарегистрированная серия 4,95; 9,9; 14,85; 19,8 Гц оказывается кратной частоте вращения ДПО 4,95 Гц или может быть также кратной частоте 44,5 Гц, для которой исходные частоты  $n \cdot 4,95$  Гц являются замаскированными. Таким образом, в режиме 5 Гц в спектре колебаний ОПО, так же как и в режиме 50 Гц, проявляется серия частот, кратных относительной частоте вращения ОПО и ДПО /лопасти вращаются в одном направлении/. Из теории спектрального анализа известно, что появление в спектре колебаний периодической серии частот  $n\omega_0$  связано с наличием периодической последовательности импульсов  $P(t+kT)$ , где  $T = 2\pi/\omega_0$ , для которой спектральная характеристика /Фурьеобраз/ есть

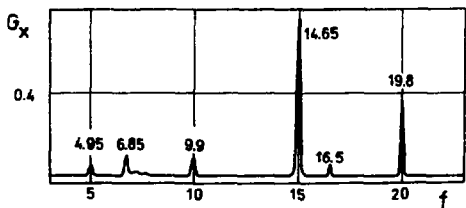
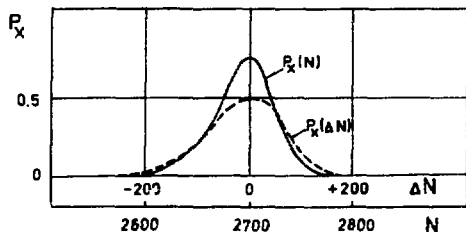
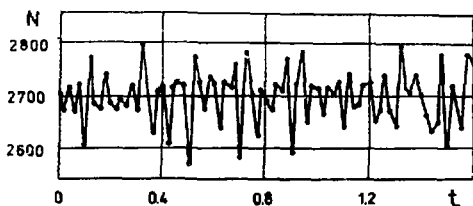


Рис.5. Режим 5 Гц. Колебания ОПО. Осевые смещения  $N$  лопасти ОПО / $N$  - номер канала АЦП, 1 канал АЦП соответствует  $4,23 \cdot 10^{-4}$  мм смещения ОПО/ в зависимости от времени  $t$  /с/. /Начало отсчета  $t$  взято произвольным образом/. Плотности распределения быстрых  $P_x(\Delta N)$  и полных колебаний  $P_x(N)$  /%/канал/. Спектральная плотность мощности  $G_x$  осевых колебаний,  $f$  - частота /Гц/.

$$F\left[\sum_{K=0}^{\infty} P(t+KT)\right] = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2\pi}{T} G_p(jn\omega_0) \delta(\omega + n\omega_0),$$

где  $G_p(jn\omega_0)$  - спектральная характеристика импульса,  $\delta(\omega + n\omega_0)$  - функция,  $\omega$  - текущая частота. Отсюда видно, что если в спектрах колебаний ОПО и ДПО наблюдается последовательный ряд частот, кратных относительной частоте вращения отражателей, то наиболее разумное объяснение этому явлению - газодинамические удары, возникающие при встречах ОПО и ДПО. Реакция отражателя на удар проявляется в резком изменении осевой составляющей скорости в момент удара.

Наглядное действие газодинамических ударов можно проиллюстрировать на колебаниях кожуха. Экспериментально наблюдалось резкое /импульсное/ отклонение кожуха в момент прохождения ОПО. На рис.6 приводятся спектры колебаний обоих сторон кожуха при заторможенном ДПО. В спектрах четко проявляется серия, кратная частоте вращения ОПО 49,5 Гц, более интенсивная на кожухе со стороны ОПО /здесь лопасть ОПО непосредственно проходит у кожуха/. В то же время на рис.6б заметна, хотя и малой интенсивности, серия 75 Гц, кратная 25 Гц. Последняя веро-

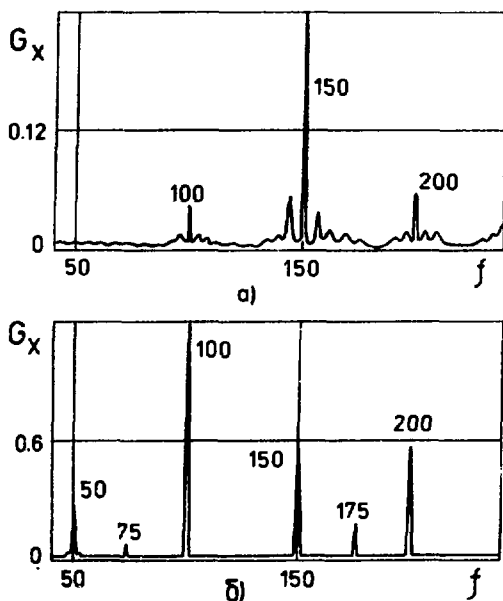


Рис.6. Спектральная плотность мощности  $G_x$  колебаний кожуха,  $f$  - частота /Гц/. а/ - со стороны ДПО, б/ - со стороны ОПО.

ОПО. Основные данные, полученные при расшифровке исходных спектров колебаний отражателей, приведены в табл.3.

### 5. КОЛЕБАНИЯ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СИЛЫ /РАСЧЕТ/

В расчетах использовалась модель линейного одночастотного осциллятора

$$\ddot{X} + 2\lambda \dot{X} + \omega_0^2 X = \frac{RM(t)}{I}, \quad /6/$$

где  $X$  - осевое смещение лопасти на расстоянии  $R$  от места крепления,  $\lambda$  - коэффициент затухания,  $\omega_0$  - собственная цик-

лнее всего вызвана механическими ударами второго звена передачи вращения ОПО в поворотном редукторе. В этом случае удар, вызванный каким-то дефектом в механике с частотой вращения промежуточного вала /25 Гц/, через станину может передаваться на кожух.

Если теперь обратиться к спектру ОПО в режиме 5 Гц, то не исключено, что наряду с проявлением газодинамических ударов на исходную серию п. 4,95 Гц наложены реальные частоты п. 4,95 Гц, обусловленные возможными механическими ударами на валу ДПО.

Учитывая, что суммарные вибрации ОПО, как видно из табл.2, возросли по сравнению с режимом 50 Гц всего на ~30%, это значение можно принять за верхнюю оценку вклада возможного механического удара на

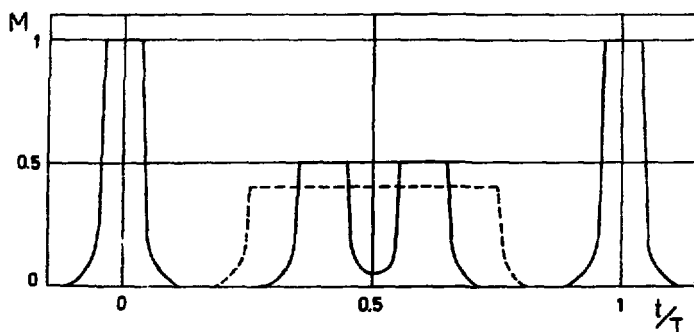


Рис.7. Расчетная форма газодинамических ударов  $M(t)$ , действующих на лопасти отражателей при встречах ОПО и ДПО в зависимости от времени  $t/T$  /  $T$  - период встречи отражателей/. Моменты времени 0 и 1 соответствуют полному совпадению лопастей. — - ДПО, ---- - ОПО.

лическая частота колебаний отражателя,  $M(t)$  - момент газодинамической силы, действующей на лопасть /рис.7/,  $I$  - момент инерции лопасти. Расчет  $M(t)$  проводился по формуле

$$M(t) = \int_S P(r) r ds, \quad //7//$$

где  $P(r) = c \cdot v^2(r)$  - давление на лопасть в точке  $r$ ,  $c$  - коэффициент пропорциональности,  $v(r)$  - относительная линейная скорость отражателей,  $S$  - площадь перекрытия ОПО и ДПО,  $S$  - функция времени.

Решение /6/ проводилось численным рекурсивным методом с аппроксимацией  $M(t)$  кусочно-линейной зависимостью  $M_i(t) = M_{i,1} t + M_{i,2}$  /  $i$  - номер интервала/. При нулевых начальных условиях процесс  $X(t)$  считался стационарным при  $t \geq 6/\lambda$ . На рис.2 для примера показаны расчетная и экспериментальная формы колебаний заторможенного ДПО. Из этого рисунка видно, что принятая модель качественно позволяет описать колебания отражателей. Заштрихованная область на экспериментальной кривой связана с наложением высших собственных частот и случайных колебаний, не учитываемых в рассматриваемой модели. Из сравнения расчетных и экспериментальных амплитуд колебаний ДПО получена верхняя оценка абсолютной величины газодинамической силы  $F(t)$ , которую в момент полного совпадения лопастей отражателей /при  $t=0$  на рис.7/ можно представить в виде



$$F(0) = \frac{4}{3R} \cdot \frac{C \cdot \omega^2}{\Delta X_{mn}^* (C)} \cdot \Delta X_{mn} \quad /8/$$

где  $C$  - константа, входящая в выражение /7/,  $\Delta X_{mn}^*$ ,  $\Delta X_{mn}$  - расчетный и, соответственно, экспериментальный размах полных колебаний ДПО,  $\omega$  - относительная угловая скорость отражателя. Значение  $F(0)$  составило 970Н.

## ВЫВОДЫ

1. В данной сборке подвижного отражателя с ДПО в виде трехзубца вибрации лопастей ОПО и ДПО, которые могут вызвать неконтролируемые флуктуации мощности реактора ИБР-2, оказались в пределах проектных требований.

2. Как показали исследования, газодинамические удары, возникающие при встречах ОПО и ДПО, не привели к дополнительному увеличению колебаний отражателей, однако характер колебаний и их спектральные характеристики по сравнению с прежним вариантом отражателя с ДПО в виде диска существенно изменились.

3. При использовании этого варианта отражателя в качестве штатного модулятора реактивности реактора ИБР-2 быстрые флуктуации мощности реактора, обусловленные вибрациями отражателей при номинальном числе оборотов ОПО /  $f = 50$  Гц/, составят в среднем  $1,5 \div 3\%$ , а максимальные флуктуации мощности -  $6 \div 15\%$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ломидзе В.Л. и др. ОИЯИ, Р13-12194, Дубна, 1979.
2. Гудовски В. и др. ОИЯИ, Р13-12483, Дубна, 1979.
3. Ломидзе В.Л. и др. ОИЯИ, Р13-12195, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 сентября 1980 года.