

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

13-85-234

Ю.Н.Пепёльшев, Хан Пхун Ги

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
МЕТОДА ЦИФРОВОЙ ДЕМОДУЛЯЦИИ
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ВЗАИМНЫХ КОЛЕБАНИЙ МОДУЛЯТОРА
РЕАКТИВНОСТИ И МОЩНОСТИ РЕАКТОРА ИБР-2

1985

Быстрые флуктуации мощности /с частотой следования более 0,2 Гц/ реактора ИБР-2 существенно зависят от детерминированных /регулярных/ колебаний реактивности, вносимых поперечными вибрациями основного /ОПО/ и дополнительного /ДПО/ подвижных отражателей /ПО//^{1/}. Интенсивность, спектральный состав, а также изменение характеристик колебаний ПО во времени во многом определяют условия стабильной и безопасной работы реактора.

В данной работе рассматриваются статистические и динамические характеристики коррелированных колебаний ПО и мощности, полученные с помощью одного из методов статистической обработки экспериментальных данных, основанного на цифровой демодуляции временных рядов. Одно из достоинств данного метода состоит в возможности получения текущей спектральной оценки нестационарных колебательных процессов. В работе описывается построение цифрового программного демодулятора и представлены некоторые результаты обработки серии отдельных измерений, проведенных в 1984 г. на уровнях средней мощности реактора от 1 до 2 МВт в режиме 5 с^{-1} .

1. МЕТОД ДЕМОДУЛЯЦИИ И ОПИСАНИЕ ЕГО ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

С помощью демодуляции определяются амплитуда $A(t) = A_0 [1 + Ma(t)]$, фаза $\phi(t)$ и средняя частота ω_0 исследуемого детерминированного колебания $X(t)$ - время, M - коэффициент модуляции, $a(t)$ - модулирующий сигнал/. На основе измеренного временного ряда $X(t)$, представленного в памяти ЭВМ конечной последовательностью значений энергии импульсов мощности или осевых отклонений ПО, формируется комплексный временной ряд

$$X_1(t) = X(t) \cdot \exp(-j\omega_0 t), \quad j = \sqrt{-1}.$$

Спектральная характеристика $S_{x1}(\omega) = F[X_1(t)]$ временного ряда $X_1(t)$ / F - оператор фурье-преобразования, ω - циклическая частота/ идентична $S_x(\omega) = F[X(t)]$, но сдвинута относительно $\omega = 0$ на частоту ω_0 :

$$S_{x1}(\omega) = S_x(\omega + \omega_0).$$

* Здесь и далее реальные дискретные величины, получаемые при обработке данных на ЭВМ, для простоты изложения представлены их непрерывными аналогами.

После низкочастотной фильтрации временного ряда $X_1(t)$, осуществляемой в виде

$$Y(t) = X_1(t) * h(t) = \text{Re} [X_1(t) * h(t)] + j \text{Im} [X_1(t) * h(t)], \quad /1/$$

где $Y(t)$ - временной ряд на выходе фильтра, $*$ - оператор свертки, $h(t)$ - импульсная характеристика фильтра, непосредственно из $Y(t)$ вычисляются амплитуда $A(t)$ и фаза $\phi(t)$:

$$A(t) = \sqrt{2 \{ \text{Re}^2 [Y(t)] + \text{Im}^2 [Y(t)] \}}, \quad /2/$$

$$\phi(t) = \text{arctg} \left\{ - \frac{\text{Im} [Y(t)]}{\text{Re} [Y(t)]} \right\}.$$

В качестве низкочастотного фильтра был использован линейный фильтр с конечной импульсной характеристикой h_s :

$$H_s(\omega) = \sum_{\ell=0}^s h_\ell \exp(j\omega \ell), \quad \text{где } H_s(\omega) - \text{частотная характеристика}$$

фильтра, h_ℓ - весовые коэффициенты фильтра. Характеристика h_s представлена набором значений $h_\ell, \ell = 0, s$. Для коэффициентов h_s использовались данные, полученные в работе^{/3/}:

$$h_0 = \frac{\omega_c}{\pi},$$

$$h_\ell = \frac{\sin \omega_c \ell}{\pi \ell} \cdot \frac{\sin(\ell \delta/2)}{\ell(\delta/2)}, \quad \ell = 1, s, \quad /3/$$

где $\omega_c = (\omega_s + \omega_p)/2$ - частота среза эквивалентного идеального /прямоугольного/ низкочастотного фильтра, $\delta = (\omega_s - \omega_p) = 4\pi/(2s+1)$ - переходная область фильтра, $(2s+1)$ - длина фильтра, $0 \leq \omega \leq 4\pi$. Для демодуляции изолированных спектральных пиков параметр s

составлял $80 \div 250$, а $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi \Delta t} \leq 0,1$ Гц. На рис.1 для примера приведена форма амплитудно-частотной характеристики фильтра $|H_s(\omega)|$ в сравнении с формой исследуемой спектральной линии.

Цифровой демодулятор был выполнен в виде отдельного модуля, входящего в общую программу спектрального анализа временных рядов^{/4/}. Демодулятор имеет некоторые дополнительные возможности, расширяющие область его применения:

1/ Выполняет поиск среднего значения частоты демодуляции ω_0 путем выделения методом наименьших квадратов линейной от времени компоненты фазы $\Delta\phi = \Delta\omega \cdot t$ для некоторого предварительно установленного начального значения частоты демодуляции ω'_0 . При этом $\omega_0 = \omega'_0 + \Delta\omega$.

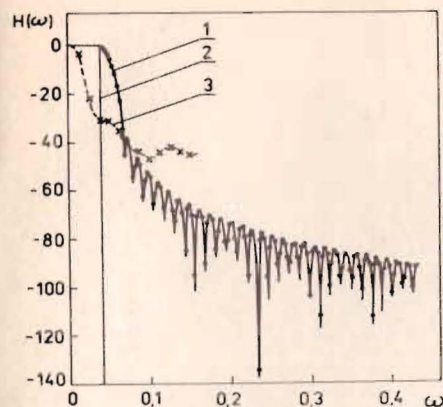


Рис.1. Амплитудно-частотные характеристики реального /1/ и эквивалентного идеального /2/ низкочастотных фильтров ($D b$) в сравнении с формой исследуемой спектральной линии /3/. Значения ω приведены в рад.

2/ Фаза, определяемая из выражения /2/ в диапазоне $\phi = [-\pi, \pi]$ вычисляется в продолженном виде. Поиск направления изменения фазы вблизи $\phi = -\pi$ или $\phi = \pi$ и переход к новому /продолженному/ значению фазы осуществляется с предварительным контролем частоты изменения фазы на величину 2π . Этот режим введен для автоматического "выключения" демодуляции в случае сигнала типа "белый шум" или в случае малого отношения сигнал/шум.

3/ Для временных рядов $A(n \cdot \Delta t)$ и $\phi(n \cdot \Delta t), n = 1, N, N \leq 2048, \Delta t = f_{\text{опр}}^{-1}$, $f_{\text{опр}}$ - частота опроса или регистрации исходного временного ряда $X(n \cdot \Delta t)$ вычисляются первые два центральных момента и некоторые другие характеристики, а также плотности распределений $P(A)$ и $P(\Delta\phi/\Delta t)$, $\Delta\phi = \phi_{n+1} - \phi_n$. Последнее - суть форма спектральной линии на частоте ω_0 .

4/ Для временного ряда $A(n \cdot \Delta t), n = 1, 2048$ вычисляется спектральная плотность мощности. Используется метод периодограмм на основе быстрого преобразования Фурье с применением окна данных Кайзера-Бесселя⁴.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Для обработки использовались экспериментальные данные, полученные в основном на мощности 1 МВт и частично во время выхода реактора на мощность 2 МВт в период энергетического пуска реактора в 1984 г. Энергия импульса мощности измерялась с помощью вакуумной камеры деления, установленной в центре активной зоны и ионизационной камеры, размещенной на выведенном нейтронном пучке. Осевые отклонения ОПО и ДПО регистрировались по сигналам с укрепленных на кожухе подвижного отражателя емкостных датчиков^{/5/}. Для изучения с помощью демодуляции реальных процессов имеет смысл рассматривать колебания, спектр которых достаточно симметричен относительно некоторого максимума на частоте ω_0 ,

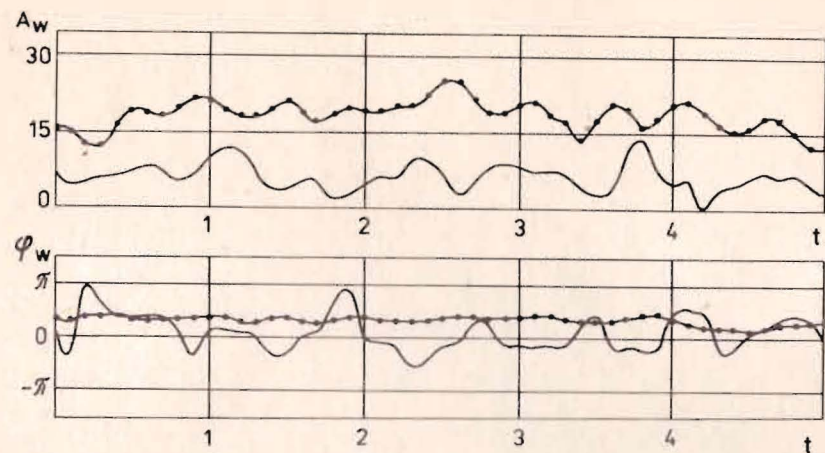


Рис.2. Типичная зависимость изменения амплитуды A_w /кВт/ и фазы ϕ_w колебаний мощности на частотах 0,811 Гц (—) и 1,633 Гц (---) от времени t /мин/. Средняя мощность реактора 1 МВт.

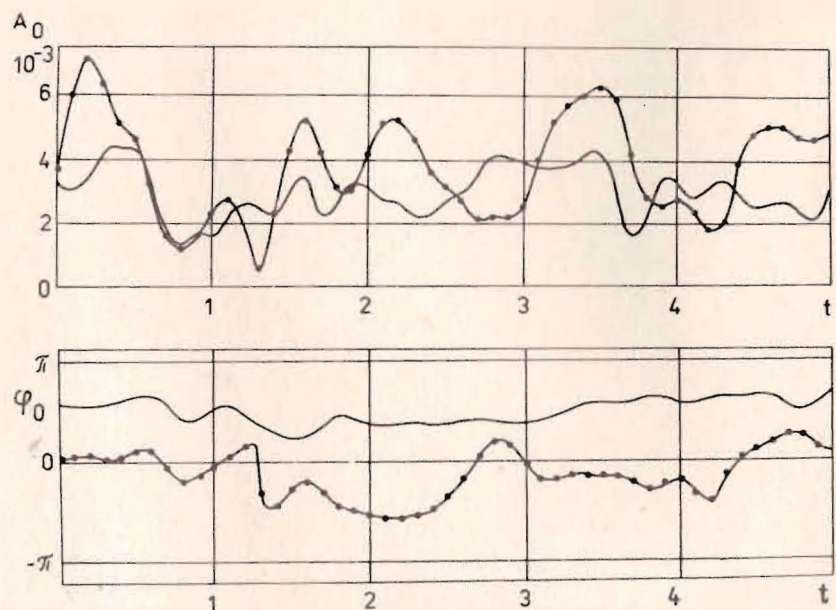


Рис.3. Амплитуда A_0 /мм/ и фаза ϕ_0 поперечных колебаний ОПО на частотах 0,811 Гц (—) и 1,633 Гц (---) в зависимости от времени t /мин/. Средняя мощность реактора 1 МВт.

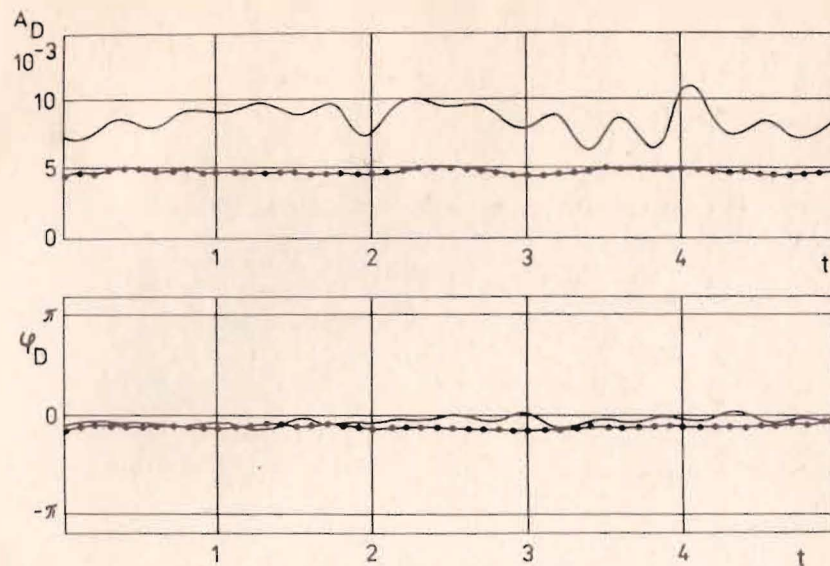


Рис.4. Амплитуда A_D /мм/ и фаза ϕ_D поперечных колебаний ДПО на частотах 0,811 Гц (—) и 1,633 Гц (---) в зависимости от времени t /мин/. Величина A_D на частоте 1,63 Гц уменьшена в 10 раз. Средняя мощность реактора 1 МВт.

а полоса частот $\Delta\Omega = 2\Omega_B$, где Ω_B - максимальная частота в спектре $a(t)$, удовлетворяет условию $\Delta\Omega \ll \omega_0$.

Из спектрального анализа известны две наиболее характерные линии во взаимных колебаниях ОПО, ДПО и мощности - это $\sim 0,8$ и $\sim 1,63$ Гц*. При постоянном режиме работы реактора интенсивность колебаний, усредненная за 30 мин, в серии измерений общей длительностью до 10 сут сохраняется в пределах 30%. После демодуляции этих колебаний выявилось довольно сильное изменение их амплитуды в зависимости от времени. На рис.2-4 приведены типичные зависимости $A(t)$ и $\phi(t)$ для колебаний мощности и осевых вибраций ОПО и ДПО. Изменение $A(t)$ и $\phi(t)$ можно представить в виде:

$$A(t) = A_0 + A_c(t), \quad A_0 = \langle A(t) \rangle,$$

$$\phi(t) = \phi_0 + \phi_c(t), \quad \phi_0 = \langle \phi(t) \rangle,$$

где $A_c(t)$, $\phi_c(t)$ - случайные составляющие амплитуды и, соответ-

* Указанным спектральным линиям соответствуют более высокие реальные частоты. Частоты $\sim 0,8$ и $\sim 1,63$ Гц активная зона "видит" как биения между частотой повторения вспышек мощности и частотой колебаний ОПО и ДПО.

ственно, фазы. Оценки средних значений амплитуды, полученных при демодуляции

$$A_0 = \frac{1}{T_0} \int_0^T A(t) dt \quad /T = 27 \text{ мин}/$$

и из спектральной обработки

$$A'_0 = [2 \int_{\Delta\omega} S(\omega) d\omega]^{1/2} \quad /\Delta\omega = 0,3 \text{ рад/с } /,$$

где $S(\omega)$ - спектральная плотность в области определения исследуемой спектральной линии, дали совпадающие результаты. Как видно из рис. 2-4, наиболее интенсивные колебания ПО и мощности наблюдаются на частоте 1,63 Гц, для которой в таблице представлены данные о величине A_0 и некоторые характеристики A_c . Величины $\sigma A_c/A_0$ и $\Delta A_{\max}/A_0$ дают количественную характеристику о вкладе случайной компоненты в характер колебаний мощности и роторов ПО. Спектральные плотности случайной компоненты амплитуды A_c на частоте ~ 1,63 Гц имеют два пика на частотах ~ 0,014 и ~ 0,033 Гц. Основные результаты, полученные при демодуляции гармонических колебаний ПО и мощности представлены в таблице.

Таблица
Средние значения A_0 , относительное стандартное отклонение $\sigma A_c/A_0$ и максимальное изменение амплитуды $\Delta A_{\max}/A_0$ колебаний энергии импульсов и осевых отклонений ОПО и ДПО на частоте 1,63 Гц

Исследуемый параметр	W, МВт	A_0	$\sigma A_c/A_0, \%$	$\Delta A_{\max}/A_0, \%$
W	I	40 ± 15	15 ± 6	75 ± 25
	I,5	53 ± 25 кВт	15 ± 6	75 ± 25
	I,8	161 ± 25	19 ± 5	80 ± 25
О П О	I	3,7	50	$120^{(x)}$
	I,5	2,5	47	220
	I,8	7,7	24	113
Д П О	I	50 мкм	3	10
	I,5	53	4	15
	I,8	69	4	18

В отдельных случаях максимальное отклонение достигало 300%.

2.1. Гармонический анализ с высокой разрешающей способностью

Одна из проблем в исследовании ПО заключается в идентификации действительных частот колебаний f_q по их замаскированным в экспериментальном спектре аналогам $f_{\text{экс}}$:

$$f_g = n f_{\text{опр}} \pm f_{\text{экс}} \quad /4/$$

$n = 0, 1, \dots$, $f_{\text{опр}}$ - частота опроса. Обычно $f_{\text{опр}}$ совпадает с частотой вращения ОПО $/f_{\text{опр}} = 25 \text{ Гц}/$ или с частотой следования импульсов мощности $/f_{\text{опр}} = 5 \text{ Гц}/$. При этом действительные частоты колебаний ПО превышают критическую частоту экспериментального спектра $f_g > f_{\text{опр}}/2$. Для уточнения вероятного значения f_g из /4/ использовалась экспериментальная зависимость типа $f_{\text{экс}} = f(f_{\text{опр}})$. Ее получение в реальных условиях вращения ПО /при полном возможном интервале $\Delta f_{\text{опр}}$ изменения $f_{\text{опр}}$, составляющем 0,1 Гц /для $f_{\text{опр}} \approx 5 \text{ Гц}/$, т.е. при $\Delta f_{\text{опр}}/f_{\text{опр}} \leq 2 \cdot 10^{-2}/$ требует разрешения в определении $f_{\text{экс}}$, равного $10^{-3} \div 10^{-4}$, в то время как наименьшая погрешность, получаемая в данных измерениях с помощью фурье-преобразований, превышает $\sim 10^{-3}$. В данной задаче демодуляция использовалась как один из методов гармонического анализа с высоким разрешением.

Это можно проиллюстрировать следующим образом. Если при истинной частоте колебаний $\omega_0 = \omega'_0 + \Delta\omega$, соответственно, полной фазе $\Psi(t) = \omega'_0 t + \Delta\omega t + \phi$, провести демодуляцию на частоте ω'_0 , то зарегистрированная фаза $\phi(t)$ будет содержать линейную компоненту $\phi(t) = \Delta\omega t + \phi$, из которой определяется величина $\Delta\omega$, а соответственно и ω_0 . В вычислительном отношении реализуется сходящийся итерационный процесс демодуляции на частоте $\omega_0(i) = \omega_0(i-1) + \Delta\omega(i-1)$, уточняемой на i -м шаге из $\phi_{i-1}(t)$. Такой подход позволяет определить изменение несущей частоты в зависимости от времени $\omega_0(t) = \omega_0 + \Delta\phi/\Delta t$ и форму спектрального пика $P[\Delta\phi/\Delta t]$, которая для исследуемых частот близка к гауссовой со стандартным отклонением $\sigma_f = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Гц}$. Погрешность определения величины $f_0 = \omega_0/2\pi$, связанная с дискретизацией исходных данных и нестабильностью скорости вращения ПО, не превышала $\sim 10^{-4} \text{ Гц}$, а погрешность машинной обработки составляла $\sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ Гц}$. При изменении скорости вращения ПО и, соответственно, изменении $f_{\text{опр}}$ в диапазоне $f_{\text{опр}} = [4,900 \div 4,984] \text{ Гц}$ величина $f_{\text{экс}}$ /для $f_{\text{экс}} = 1,63 \text{ Гц}/$ связана с $f_{\text{опр}}$ зависимостью:

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

Из анализа выражений /4/ и /5/ следует:

$$\begin{cases} f_g = /n \pm 0,3/f_{\text{опр}} \pm 0,148 \\ \frac{\Delta f_g}{f_g} = \frac{\Delta f_{\text{опр}}}{f_{\text{опр}}} \quad \text{при } n \geq 1. \end{cases} \quad /6/$$

Наибольший интерес представляет одна из возможных действительных частот при $n=3$, $f_g = 3,3 \cdot f_{опр} + 0,148$, которую можно связать с вынужденными колебаниями ОПО $f_g^* = f_{опо} / 1,5 = 10 / 3 f_{опр}$, 1,5 - передаточное число поворотного редуктора привода ОПО. Зарегистрированное в 50 измерениях относительное отклонение f_g от ожидаемого f_g^* составило ~ 1%. Полученные данные указывают на то, что частота 1,63 Гц, вероятнее всего, относится к вынужденным колебаниям ПО. Частота этих колебаний $f_g = 2/3 f_{опо}$ непосредственно зависит от частоты вращения ротора двигателя в приводе ПО и обычно изменяется от 16,3 до 16,7 Гц.

2.2. Случайные колебания фазы ϕ_c и нестабильность скорости вращения ПО

Изменение во времени скорости вращения ПО /"дрожание" скорости/ непосредственно сказывается на флуктуациях фазы и, соответственно, частоте зарегистрированных колебаний. Для оценки этого влияния регистрируемый процесс представим в виде

$$Y(t) = X[t + \tau(t)],$$

где $\tau(t)$ - плотность распределения периода дискретизации /периода вращения ОПО или ДПО/. Тогда плотность шума фазы колебания на частоте f_0 , обусловленная $\tau(t)$, равна

$$\phi_g(t) = \tau(t) \cdot 2\pi f_0.$$

Для максимальных отклонений периода вращения ОПО $\Delta \tau_{\max} = 1 \cdot 10^{-3}$ с, полученных из $\tau(t)$ в дополнительных измерениях, максимальное отклонение фазы $\Delta \phi_{\max}$ на частоте 1,63 Гц составляет $\sim 10^{-2}$ рад, т.е. ~ 1% от наблюдаемой максимальной величины $\phi_c(t)$ /см.рис.3/. Соответствующий анализ, проведенный также для колебаний ДПО, показал, что случайные колебания фазы исследуемых процессов не связаны непосредственно с нестабильностью скорости вращения ПО, а обусловлены, вероятнее всего, случайным изменением сил, действующих на ПО.

2.3. Локальные во времени "резонансы" колебаний мощности

В отдельных измерениях при средней мощности реактора 1 МВт наблюдается существенное /в ~ 3-12 раз/ превышение текущих значений амплитуды колебаний мощности на частотах ~ 0,8 и ~ 1,63 Гц над их средним уровнем. Развитие такого нестационарного процесса /локального "резонанса"/ во времени представлено на рис.5. Потенциальная возможность наложения колебаний с суммированием

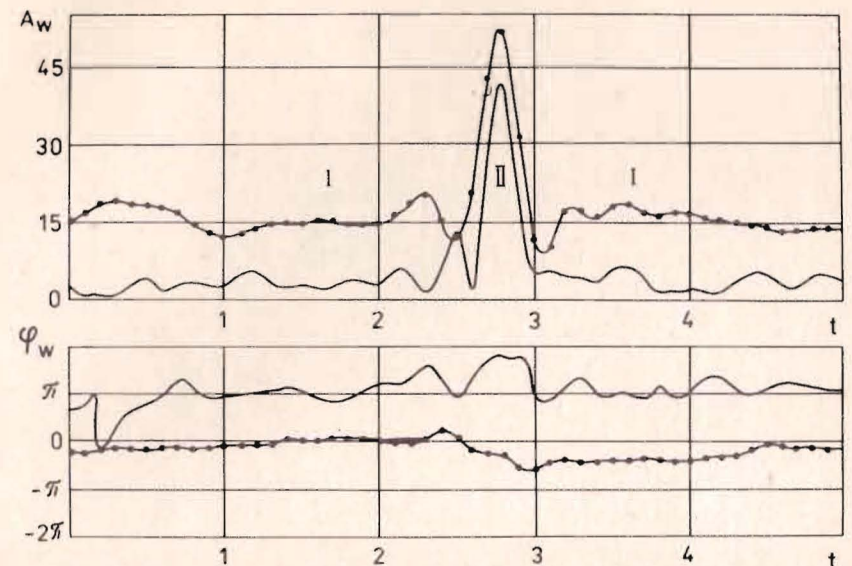


Рис.5. Форма локального во времени "резонанса" /область II/, зарегистрированного в колебаниях мощности на частотах 0,811 Гц (—) и 1,633 Гц (---). A_w - амплитуда колебаний /кВт/, ϕ_w - фаза, t - время /мин/. Средняя мощность реактора 1 МВт, суммарный расход теплоносителя через активную зону - 80 м³/ч.

амплитуд может привести к кратковременному увеличению результирующих максимальных флуктуаций мощности на +8% и более. Качественное рассмотрение возможных причин нарушения стационарности в колебаниях мощности реактора можно провести на основе модели, описывающей ПО/ОПО или ДПО/ в виде линейного одночастотного осциллятора с коэффициентом затухания λ и частотой свободных колебаний ω_c . Спектральная характеристика флуктуаций мощности $S_W(\omega)$, обусловленных колебаниями ПО под действием силы $S_F(\omega)$, имеет вид

$$S_W(\omega) = S_F(\omega) \cdot H_X(\omega) \cdot H_W(\omega) \cdot \frac{c}{m}, \quad //7/$$

где $H_X(\omega) = [(\omega_c^2 - \omega^2) + j2\lambda\omega]^{-1}$ - частотная характеристика ПО, $H_W(\omega)$ - частотная характеристика реактора, c - коэффициент пропорциональности, m - масса ПО.

Рассмотрим отношение амплитуды колебаний на частоте ω_0 в области локального "резонанса" $A_w(\omega_{02})$ к амплитуде вне его $A_w(\omega_{01})$ /индексы 2 и 1 соответственно относятся к указанным областям /см.рис.5//:

$$\eta(\omega_{02}, \omega_{01}, t) = \frac{A_W(\omega_{02})}{A_W(\omega_{01})} = \frac{|S_W(\omega_{02})|}{|S_W(\omega_{01})|}.$$

Здесь возможны два случая:

- 1/ зарегистрированная частота ω_0 является резонансной частотой колебаний ПО $\omega_0 = \omega_p$;
- 2/ частота ω_0 находится вдали от области резонанса ПО, $\omega_0 \neq \omega_p$.

Отметим, что из анализа рис.5 следует $\omega_{01} = \omega_{02}$, а при малых колебаниях ПО и мощности справедливо

$$H_{W2}(\omega_0) \approx H_{W1}(\omega_0).$$

Для случая 1 модуль $|H|$ на частоте резонанса ПО

$$\omega_p = (\omega_c^2 - 2\lambda^2)^{1/2} = \omega_c \quad \text{при} \quad \lambda^2 \ll \omega_c^2$$

равен:

$$A_{Wp}(\omega_p) = \frac{F(\omega_p) \cdot |H_W(\omega_p)| \cdot c}{2\lambda m \omega_p}$$

/согласно ^{5/} для собственных колебаний ОПО $\lambda^2 \sim 10^{-2} \text{ с}^{-2}$, а $\omega_c / 2\pi \geq 50 \text{ Гц}$. Отсюда

$$\eta(\omega_p, t) = \frac{F_2(\omega_p)}{F_1(\omega_p)} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \quad \omega_0 = \omega_p.$$

Отношение λ_1/λ_2 характеризует возможное изменение механических параметров ПО, а F_2/F_1 - изменение внешних сил, действующих на ПО при переходе в область локального "резонанса".

Во втором случае, если наблюдаемая частота $\omega_0 \neq \omega_p$, то

$$\eta(\omega_0, t) = \frac{F_2(\omega_0)}{F_1(\omega_0)}.$$

Максимальное зарегистрированное значение $\eta(t) = 12$. Если при этом допустить $\lambda_1 = 12\lambda_2$, то для коэффициента внутреннего трения $\beta(\lambda = \beta/m)$ следует принять $\beta_1 = 12\beta_2$, что практически невозможно. Кроме того, при изменении β в общем случае изменяется и жесткость системы, а следовательно, и ω_p , но $\omega_{01} = \omega_{02}$. Поэтому при $\omega_0 = \omega_p$ наиболее вероятно следующее:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \approx 1, \quad \eta(\omega_p, t) = \frac{F_2(\omega_p)}{F_1(\omega_p)}.$$

Таким образом, область локального "резонанса", вероятнее всего, обусловлена ростом внешних сил, действующих на ПО на частоте $\sim 0,8$ и $\sim 1,63 \text{ Гц}$. В этом случае возможный источник возмущений, "запускающих" развитие неустойчивости в колебаниях ПО, может быть связан с появлением некоторого дополнительного дефекта в приводе ПО.

2.4. Оценка частотной характеристики реактора

На основе средних значений амплитуды колебаний мощности $\langle A_W(\omega) \rangle$ и вибраций ПО $\langle A_X(\omega) \rangle$ в отдельных случаях можно оценить модуль частотной характеристики реактора $|H(\omega)|_{WX}$ в виде

$$|H(\omega)|_{WX} = \frac{\langle A_W(\omega) \rangle}{\langle A_X(\omega) \rangle}.$$

Так, на частоте 0,811 Гц при средней мощности реактора 1 МВт значения $|H|_{WX}$ относительно поперечных колебаний ОПО и ДПО, измеренных нижними емкостными датчиками, составляют:

$$|H|_{WX} = \begin{cases} 1220 \text{ кВт/мм для ОПО} \\ 300 \text{ кВт/мм для ДПО.} \end{cases}$$

Эти данные точно отражают соотношение дифференциальных эффективностей при осевом сдвиге ОПО и ДПО, но меньше приблизительно в 2 раза оценок флуктуаций мощности, полученных по известным соотношениям динамики реактора для наблюдаемых вибраций ПО. Это дополнительно подтверждает, что вибрации лопастей ПО в месте встречи вблизи активной зоны меньше вибраций, наблюдаемых в месте расположения датчиков. Датчики ОПО и ДПО расположены на расстоянии, соответственно, 151° и 129° от центра активной зоны по направлению вращения ПО/.

Основные выводы:

Применение цифровой демодуляции для изучения поперечных вибраций ПО и флуктуаций мощности реактора позволяет:

1. Провести гармонический анализ с высокой разрешающей способностью $\Delta f = 10^{-4} \text{ Гц}$. Практически Δf на порядок меньше, чем можно получить на основе фурье-преобразований.
2. Получить в ряде случаев простым путем численную оценку передаточной функции реактора относительно измеряемых осевых вибраций ПО.
3. Выявить появление нестационарных процессов в колебаниях ПО и мощности реактора, скрытых от наблюдения при "обычном" статистическом анализе.
4. Использовать демодуляцию для оперативного контроля за состоянием подвижных отражателей.

Практические результаты применения демодуляции следующие:

1. Флуктуации скорости ПО практически не влияют на поперечные вибрации лопасти ПО.

2. Основные частоты взаимных колебаний ПО и мощности $\sim 0,8$ и $\sim 1,63$ Гц строго детерминированы и при постоянной скорости вращения ПО флуктуируют в пределах $\sim 10^{-2}$ Гц. Среднее значение частоты $1,63$ Гц линейно зависит от частоты вращения ПО.

3. При средней мощности реактора 1 МВт возможно кратковременное /в течение 1 мин/ увеличение амплитуды колебаний на частоте $\sim 0,8$ Гц в 12 раз и в 3 раза на частоте $\sim 1,63$ Гц. Возможное дополнительное увеличение максимальных флуктуаций мощности в этом случае составляет $\pm 8\%$. Вероятный источник этого возмущения связан с кратковременным ростом внешних сил, действующих на ПО со стороны привода.

В заключение необходимо отметить, что демодуляция позволяет полнее выявить различные особенности в колебаниях мощности и ПО, а также оценить их характеристики, необходимые для оптимизации режима работы реактора и для контроля за его состоянием.

Авторы выражают глубокую благодарность Е.П.Шабалину за ряд ценных замечаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ломидзе В.Л. и др. ОИЯИ, Р13-1295, Дубна, 1979.
2. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. "Мир", М., 1982.
3. Bloomfield P. Fourier Analysis of time Series. John Wiley and Sons, 1976.
4. Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д. ОИЯИ, Р13-84-73, Дубна, 1984.
5. Вагов В.А. и др. ОИЯИ, Р13-82-593, Дубна, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 мая 1985 года

Пепельшев Ю.Н., Хан Пхун Ги

13-85-234

Использование метода цифровой демодуляции для параметров взаимных колебаний модулятора реактивности и мощности реактора ИБР-2

Сообщается об использовании цифровой программной демодуляции при экспериментальном исследовании коррелированных колебаний модулятора реактивности и мощности реактора ИБР-2. Показано, что с помощью демодуляции могут быть получены различные статические и динамические характеристики связанных нестационарных колебательных процессов, требуемые для исследования и оптимизации режимов работы реактора. Отмечается, что при использовании демодуляции возможно наблюдение "скрытых" нестационарных процессов в колебаниях мощности и получение оценок передаточных характеристик реактора.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Pepelyshev Yu.N., Khan Phum Gu

13-85-234

Utilization of the Digital Demodulation Method in the Study of Parameters of the Correlation between the Reactivity Modulator Vibrations and IBR-2 Reactor Power Oscillations

Utilization of the digital demodulation in the experimental study of correlation between the reactivity modulator oscillations and the IBR-2 reactor power oscillations is reported. It is shown that by means of demodulation various statical and dynamical characteristics of correlated nonstationary oscillation processes necessary for the study and optimization of the reactor modes. It is noted that using the demodulation method one could observe "hidden" nonstationary processes in power oscillations and estimate the transmission characteristics of the reactor.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985