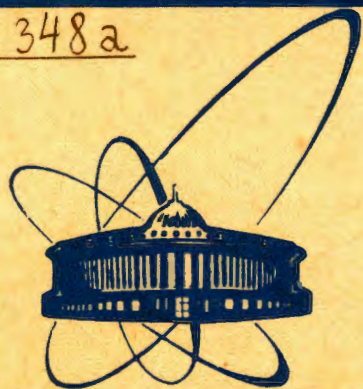


81-656

С 348а



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

6487/1-81

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛ

P13-81-656

В.Д.Денисов, А.К.Попов, В.Т.Руденко

ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ИБР-30

1981

В работе /1/ для реактора ИБР-30 были вычислены оценочные частотные характеристики мощностной обратной связи. Они были получены путем применения Фурье-преобразования к переходному процессу мощности реактора, возникающему при резком изменении уровня реактивности. В /1/ для упрощения вычислений шесть групп запаздывающих нейтронов аппроксимировались одной эквивалентной группой, а нелинейная зависимость между отклонением от первоначального среднего уровня реактивности и соответствующим отклонением энергии, выделяемой в течение импульса мощности, линеаризовалась.

Приведенные в настоящей работе частотные характеристики мощностной обратной связи вычислены без указанных упрощений. Были рассмотрены два переходных процесса мощности при уменьшении уровня реактивности при помощи стержня ручного регулятора в течение примерно 1 с. Перемещения производились в зоне линейной зависимости реактивности стержня от его перемещения. Один переходный процесс соответствовал случаю, когда до момента изменения реактивности реактор работал с частотой 5 импульсов мощности в секунду при средней мощности 5 кВт, а другой - при средней мощности 2 кВт.

Для каждого импульса мощности регистрировалась амплитуда, пропорциональная энергии, выделяемой в течение импульса. Для обоих случаев после изменения реактивности регистрировалось около 400 импульсов, то есть переходные процессы регистрировались в течение примерно 80 с. Кроме того, для вычисления установившегося значения средней мощности регистрировалось несколько десятков импульсов мощности спустя примерно 140 с после изменения уровня реактивности. На рис. 1 показана зарегистрированная последовательность импульсов мощности при начальной средней мощности реактора 5 кВт.

Обработка зарегистрированной последовательности импульсов заключалась в следующем. Усреднением соответственно по L и M импульсам /см. рис. 1/ вычислялись начальное E'_0 и установившееся $E'_{уст.}$ значения энергии импульсов мощности:

$$E'_0 = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L E'_n, \quad E'_{уст.} = \frac{1}{M} \sum_{n=NN-M+1}^{NN} E'_n. \quad /1/$$

Для упрощения расчетов мощность реактора представлялась в виде последовательности идеализированных импульсов. Между

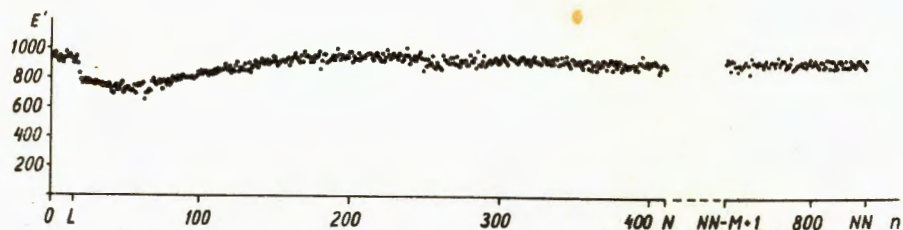


Рис.1. Изменение энергии импульсов мощности E' в относительных единицах при понижении уровня реактивности. n - порядковый номер импульса.

импульсами мощность принималась равной нулю. Каждый импульс представлялся δ -функцией, умноженной на суммарную энергию E , выделяемую как в течение данного импульса, так и в промежутке между данным импульсом и предшествующим.

В качестве начального и установившегося значений энергии E принимались соответственно

$$E_0 = cE'_0, \quad E_{уст.} = cE'_{уст.}, \quad /2/$$

где $c=1,05$ есть среднее значение отношения энергии, выделяемой за период следования импульсов, к энергии импульса при установившемся режиме.

Зависимость энергии каждого импульса E' от источника нейтронов S перед началом развития импульса и от максимального значения реактивности ϵ , достигаемого в течение этого импульса, принималась в виде

$$E' = SA \exp(\epsilon), \quad /3/$$

где A - константа; ϵ - реактивность в относительных единицах, в так называемых долях $^{11}\beta$ импульсного¹¹.

Используемые в уравнении /3/ значения источника нейтронов /в относительных единицах/ вычислялись по следующей формуле:

$$S_n = \sum_{m=1}^{n-1} E_m \sum_{i=1}^6 \mu_i \lambda_i \exp\{-\lambda_i(n-m)T'\}, \quad /4/$$

где μ_i - отношение доли запаздывающих нейтронов β_i группы i к суммарной доле всех запаздывающих нейтронов β ($\mu_i = 0,038; 0,28; 0,216; 0,328; 0,103; 0,035$); λ_i - постоянная распада источников запаздывающих нейтронов группы i в $1/c$ ($\lambda_i = 0,0129; 0,0311; 0,134; 0,331; 1,26; 3,21$); T' - период следования импульсов в секундах; $n=2, \dots, N$ - номер импульса.

Для $n=1$

$$S_1 = E' \sum_{i=1}^6 \frac{\mu_i \lambda_i}{\exp(\lambda_i T') - 1}. \quad /5/$$

Вычислялись соответствующие каждому импульсу отклонения реактивности от первоначального /усредненного по L импульсам/ значения:

$$\Delta \epsilon = \ln(E'/S) - \overline{\ln(E'/S)},$$

$$\text{где } \overline{\ln(E'/S)} = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \ln(E'/S). \quad /6/$$

Случайные составляющие в последовательностях E и $\Delta \epsilon$ ослаблялись с помощью линейной фильтрации, в результате чего получались сглаженные последовательности \tilde{E} и $\tilde{\Delta \epsilon}$:

$$\tilde{E}_j = \frac{1}{2K+1} \sum_{n=j-K}^{j+K} E_n, \quad \tilde{\Delta \epsilon}_j = \frac{1}{2K+1} \sum_{n=j-K}^{j+K} \Delta \epsilon_n, \quad j=K+1, \dots, N-K. \quad /7/$$

Расчеты проводились при различных K . Увеличение K , уменьшая составляющие, обусловленные случайными процессами, одновременно искажает /сглаживает/ и регулярные составляющие. Результаты вычислений, приводимые ниже, относятся к усреднению по пяти импульсам, то есть для $K=2$.

Вычислялись наименьшее значение $\tilde{\Delta \epsilon}_{\min}$, номер импульса j_m , при котором $\tilde{\Delta \epsilon}$ достигает минимального значения, а также начальное значение $\Delta \epsilon_0$:

$$\Delta \epsilon_0 = \frac{1}{NM} \sum_{n=1}^{NM} \Delta \epsilon_n, \quad /8/$$

где $NM = j_m - 10$.

Значение $\Delta \epsilon_0$ получилось близким к теоретическому /нулевому/ значению, по модулю почти на 2 порядка меньше, чем $\tilde{\Delta \epsilon}_{\min}$.

Отклонение реактивности $\tilde{\Delta \epsilon}$ рассматривалось как результат наложения реактивности $\Delta \epsilon_3$, обусловленной перемещением стержня ручного регулятора, и реактивности $\Delta \epsilon_p$ отрицательной мощности обратной связи:

$$\tilde{\Delta \epsilon} = \Delta \epsilon_3 - \Delta \epsilon_p, \quad /9/$$

$$\text{причем } \Delta \epsilon_3 = \tilde{\Delta \epsilon}_{\min} - \Delta \epsilon_0. \quad /10/$$

Обусловленное мощностной обратной связью отклонение реактивности как функция времени представлялось в виде

$$\Delta \epsilon_p(t) = \sum_{j=K}^{\infty} \Delta \epsilon_{pj} \delta(t-jT'), \quad /11/$$

где

$$\Delta \epsilon_{Pj} = \begin{cases} 0 & \text{при } j \leq j_m, \\ \Delta \tilde{\epsilon} - \tilde{\epsilon}_{\min} & \text{при } j_m < j \leq N-K, \\ \Delta \tilde{\epsilon}_p = -\Delta \epsilon_3 & \text{при } j > N-K, \end{cases}$$

уст.

δ - дельта-функция. Аналогично представлялось и отклонение сглаженной мощности от среднего начального уровня:

$$\Delta \tilde{P}(t) = \sum_{j=K}^{\infty} \Delta \tilde{E}_j \delta(t-jT'), \quad /12/$$

где

$$\Delta \tilde{E}_j = \begin{cases} 0 & \text{при } j = K, \\ \tilde{E}_j - E_0 & \text{при } K < j \leq N-K, \\ \tilde{E}_{уст.} - E_0 & \text{при } j > N-K. \end{cases}$$

Наконец, применяя фурье-преобразование к выражениям /11/ и /12/, вычислили амплитудно-фазовую частотную характеристику /АФХ/ мощностной обратной связи:

$$W_{oc}(j\omega) = \frac{\Delta \epsilon_P(j\omega)}{\Delta \tilde{P}(j\omega)}. \quad /13/$$

Структурная схема реактора с мощностной обратной связью показана на рис. 2.

На рис. 3а для случая средней мощности реактора 5 кВт отмечены значения АФХ, вычисленные для круговой частоты $\omega_0=0$, а также для диапазона частот, начиная с $\omega_1=3,16 \cdot 10^{-3}$ 1/с, до частоты ω_2 , при которой модуль АФХ становится меньше 0,1 модуля АФХ, соответствующего $\omega_0=0$. При вычислении значения каждой последующей частицы в указанном диапазоне принималось большее, чем предыдущее, в 1,12 раза.

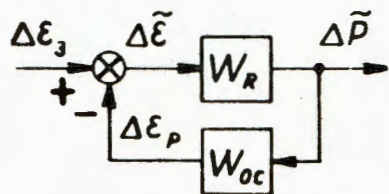


Рис.2. Структурная схема реактора с мощностной обратной связью: $W_R(j\omega)$, $W_{oc}(j\omega)$ - амплитудно-фазовые характеристики соответственно реактора нулевой мощности и обратной связи.

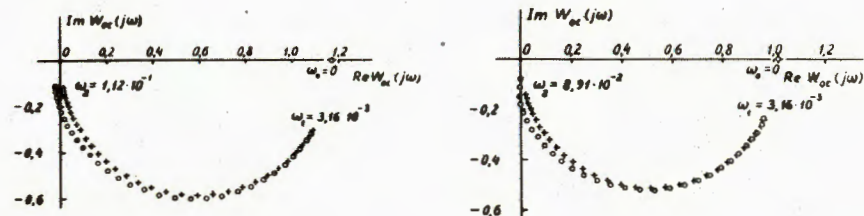


Рис.3. Амплитудно-фазовые характеристики мощностной обратной связи при средней мощности реактора 5 кВт /а/ и 2 кВт /б/; 0 - значения вычисленной АФХ; + - значения аппроксимирующей АФХ.

Вычисленная АФХ аппроксимировалась амплитудно-фазовой характеристикой инерционного звена:

$$W_A(j\omega) = \frac{k}{1 + Tj\omega}. \quad /14/$$

Коэффициент усиления k определялся из условия

$$W_A(0) = W_{oc}(0). \quad /15/$$

Значение постоянной времени T оптимизировалось. Для этого рассматривалось N_ω значений $T=1/\omega_c$, где частоте сопряжения ω_c последовательно придавались значения всех частот из указанного диапазона $\omega_1 \div \omega_2$. Для каждого значения T вычислялось для указанного диапазона частот среднее относительное отклонение модулей вычисленной и аппроксимирующей АФХ:

$$\Delta = \frac{1}{N_\omega} \sum_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|W_A(j\omega) - W_{oc}(j\omega)|}{|W_{oc}(j\omega)|}, \quad /16/$$

где N_ω - количество вычисляемых значений АФХ в диапазоне частот $\omega_1 \div \omega_2$.

Окончательно принималось то значение T , при котором Δ достигло наименьшего значения /около 10%/.

Значения $W_A(j\omega)$, соответствующие тем же частотам, что и значения $W_{oc}(j\omega)$, приведены на рис. 3а.

На рис. 3б показаны результаты аналогичных вычислений для случая средней мощности реактора 2 кВт. Основные исходные и расчетные величины сведены в таблицу. В ней указаны также усредненные значения коэффициента усиления и постоянной времени, соответствующие предположению независимости этих параметров от уровня мощности.

Таблица
основных исходных и расчетных величин

Начальная средняя мощность P_0 , кВт	5	2
Установившаяся средняя мощность $P_{уст}$, кВт	4,86	1,885
Установившееся отклонение средней мощности ΔP , кВт	-0,14	-0,115
Частота импульсов мощности $1/T$, имп/с	5	5
Смещение стержня ручного регулятора, зарегистрированное по сельсину, Δl , мм	-1,3	-1
Изменение реактивности посредством ручного регулятора $\Delta \epsilon_3$, доли " β импульсного"	-0,164	-0,117
Отношение $\Delta \epsilon_3 / \Delta l$, доли " β имп."/мм	0,126	0,117
То же среднеарифметическое	0,122	
Количество зарегистрированных импульсов мощности N	412	452
Номер импульса, соответствующий минимуму сглаженной реактивности j_m	23	31
Отношение установившегося отклонения средней мощности к смещению стержня ручного регулятора $\Delta P / \Delta l$, кВт/мм	0,108	0,115
То же среднеарифметическое, $(\Delta P / \Delta l)_{ср}$	0,112	
Количество вычисляемых в диапазоне частот $\omega_1 \div \omega_2$ значений АФХ N_ω	32	30
Коэффициент усиления мощностной обратной связи k , доли " β имп."/кВт	1,17	1,02
То же среднеарифметическое, $k_{ср}$	1,1	
Постоянная времени мощностной обратной связи T , с	89,1	79,4
То же среднеарифметическое, $T_{ср}$	84,2	
Частота сопряжения ω_c , 1/с	0,0112	0,0126
Среднее относительное отклонение модулей вычисленной и аппроксимирующей АФХ Δ	0,099	0,099

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате обработки зарегистрированных переходных процессов мощности реактора ИБР-30 при резком изменении уровня реактивности штатным органом управления получена амплитудно-фазовая частотная характеристика мощностной обратной связи для случаев средней мощности 5 и 2 кВт. Мощностная обратная связь аппроксимирована инерционным звеном.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов А.К., Рогов А.Д., Руденко В.Т. ОИЯИ, 13-80-95, Дубна, 1980.