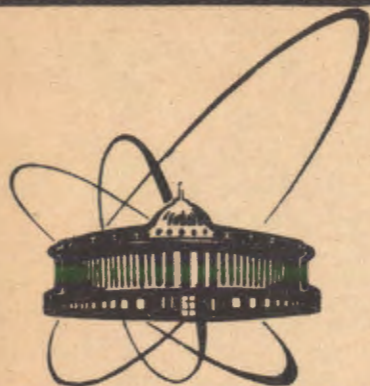


90-203



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

+

П-58

P13-90-203

А.К. Попов

ЧАСТОТНАЯ И ИМПУЛЬСНАЯ ПЕРЕХОДНАЯ
ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНОЙ ОБРАТНОЙ
СВЯЗИ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ИБР-2

1990

Настоящее сообщение посвящено оценке параметров мощностей обратной связи импульсного реактора периодического действия. В работах /1-4/ оценка параметров осуществлялась путем математической обработки зарегистрированных переходных процессов мощности, которые возникали при разовом быстром изменении уровня реактивности. Ниже для реактора ИБР-2 параметры мощностной обратной связи определяются путем математической обработки зарегистрированных колебаний мощности, вызванных периодическими колебаниями реактивности в широком диапазоне частот.

СВОДКА НЕКОТОРЫХ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- λ_1, μ_1 - соответственно постоянная распада и относительная доля запаздывающих нейтронов группы 1 / $l = 1, \dots, 6$ /.
- β_n - импульсная доля запаздывающих нейтронов, аналогичная для запаздывающих нейтронов β в стационарном /не импульсном/ реакторе.
- t - время.
- T_n - период импульсов мощности.
- $\bar{t} = t / T_n$ - время в относительных единицах.
- n, k - номера импульсов при рассмотрении соответственно периодических колебаний мощности и переходных характеристик.
- $E(n)$ - энергия n -го импульса мощности.
- E_0 - среднее значение энергии импульсов при периодических колебаниях мощности.
- $\Delta E(n) = E(n) - E_0$, $e(n) = \Delta E(n) / E_0$ - соответственно отклонение энергии от среднего значения в абсолютных и относительных единицах.
- $\rho_3(n), \rho_{0.c.}(n), \rho(n)$ - реактивности, выраженные в β_n : задающая, обратной связи и результирующая, соответствующие n -му импульсу мощности.
- $S(n), s(n) = (S(n) - S_0) / S_0$ - соответственно значение источника запаздывающих нейтронов /перед началом развития n -го импульса мощности/ и его отклонение от среднего значения S_0 в относительных единицах.
- $f, \omega = 2\pi f$, $\bar{\omega} = \omega T_n$ - соответственно частота в Гц и круговая частота в s^{-1} и в относительных единицах.

$\Delta E^*(\bar{t}) = \sum_{n=1}^M \Delta E(n) \delta[\bar{t} - (n-1)]$ - импульсная функция времени, отличная от нуля лишь в дискретные моменты времени $\bar{t} = n$. δ - дельта-функция.

$\Delta E^*(j\bar{\omega})$ - фурье-изображение функции $\Delta E^*(\bar{t})$. Аналогично попарно связаны $\rho_{o.c.}^*(j\bar{\omega})$ с $\rho_{o.c.}(t)$ и другие функции.

$W^*(j\bar{\omega})$ - частотная импульсная передаточная функция. $h^*(k), w^*(k)$ - соответственно переходная и импульсная переходная характеристики, т.е. реакция соответственно на единичный скачок и на единичный импульс.

Индексом в виде звездочки помечены импульсные функции времени или полученные из них частотные функции. Остальные обозначения поясняются в тексте по ходу изложения.

ЧАСТОТНАЯ ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ

В импульсном реакторе из-за наличия модулятора реактивности почти вся энергия выделяется в течение импульсов, длительность которых на несколько порядков меньше периода следования импульсов. В связи с этим регистрировались последовательности значений энергии, выделяемой в импульсах мощности. При этом до начала периодических колебаний в реакторе поддерживался стабильный уровень мощности. Частота следования импульсов мощности составляла $f_{\text{и}} = 5$ имп./с.

Колебания мощности вызывались колебаниями реактивности за счет периодических перемещений органа управления из одного фиксированного положения в другое в диапазоне частот от 2,5 до 0,022 Гц^{1/5}. Наибольшие отклонения мощности от среднего уровня составляли примерно 10%. Это позволило при математической обработке зарегистрированных данных использовать выражение частотной импульсной передаточной функции реактора^{1/6}:

$$W_R^*(j\bar{\omega}) = \frac{e^*(j\bar{\omega})}{\rho_3^*(j\bar{\omega})} = \frac{1}{1 - W_s^*(j\bar{\omega}) - W_p^*(j\bar{\omega})} \quad /1/$$

Структурная схема линеаризованного импульсного реактора показана на рис.1.

Значения $e(n)$, которые использовались в расчетах, были получены усреднением L периодов. Для разных частот L составляло величину от 200 до 6000. В результате усреднения ослаблялись составляющие энергии импульсов, которые не были связаны с задающими периодическими изменениями реактивности, а случайные составляющие с нормальным законом распределения уменьшались в \sqrt{L} раз^{1/5}.

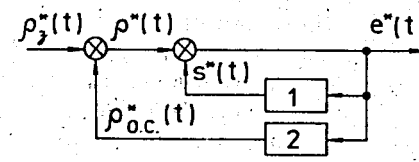


Рис.1. Структурная схема импульсного реактора: 1 - блок обратной связи по запаздывающим нейтронам, 2 - блок мощностной обратной связи, обусловленной разогревом реактора.

Для каждой частоты вычислялась комплексная функция $\sigma_e(j\bar{\omega})$, входящая в функцию $e^*(j\bar{\omega})$ ^{1/7}:

$$e^*(j\bar{\omega}) = \frac{\exp(j\bar{\omega}M)}{\exp(j\bar{\omega}M) - 1} \sigma_e(j\bar{\omega}), \quad /2/$$

$$\sigma_e(j\bar{\omega}) = \sum_{n=1}^M e(n) \exp[-j\bar{\omega}(n-1)], \quad /3/$$

где M - число импульсов за период.

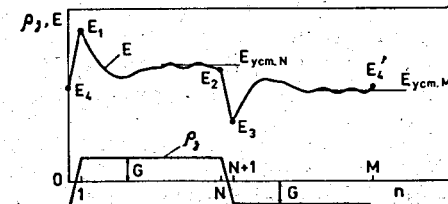
Реактивность, вносимая колебаниями органа управления, изменялась по закону:

$$\rho_3(n) = \begin{cases} G & \text{при } 1 < n < N, \\ -G & \text{при } N+1 < n < M, \end{cases} \quad \text{где } N = M/2, \quad /4/$$

т.е. за время между соседними импульсами изменялась по модулю на $2G$. Значение G не измерялось. Оно вычислялось следующим образом. Рассматривался наиболее длительный период колебаний, составлявший 45,6 с /условно показан на рис.2/. Значения энергии импульсов для этого случая были вычислены путем усреднения по 1000 периодам. При скачках реактивности энергии импульсов изменялась от величины E_2 до E_3 и от E_4 до E_1 . При этом значение E_2 /как и E_4 / наблюдалось спустя 22,6 с после предыдущего скачка реактивности, когда переходный процесс, обусловленный этим скачком, практически заканчивался.

Для каждого импульса справедливо соотношение

$$E(n) = AS(n) \exp \rho(n), \quad /5/$$



где A - константа для достаточно широкого диапазона значений $E(n)$.

Рис.2. Периоды колебаний задающей реактивности ρ_3 и огибающей энергии импульсов E .

Для соседних импульсов под номерами N и N+1 значения S(N) и S(N+1) практически одинаковы, поэтому, как следует из /5/, справедливо соотношение $G=0,5 |\ln E_3/E_2|$. Аналогичные рассуждения для импульсов M и 1 приводят к соотношению $G=0,5 \ln E_1/E_4$. В качестве G принималось среднеарифметическое из двух значений:

$$G = 0,25 (\ln E_1/E_4 + |\ln E_3/E_2|), \quad /6/$$

которое получилось равным $G = 0,0542 \beta_{и}$. После этого по аналогии с $\sigma_e(j\bar{\omega})$ /3/ вычислялась функция $\sigma_{p3}(j\bar{\omega})$, затем частотная импульсная передаточная функция реактора

$$W_R^*(j\bar{\omega}) = \sigma_e(j\bar{\omega}) / \sigma_{p3}(j\bar{\omega}), \quad /7/$$

и, наконец, в соответствии с формулой /1/ - частотная импульсная передаточная функция мощностной обратной связи

$$W_p^*(j\omega) = \frac{\rho_{o.c.}^*(j\bar{\omega})}{e^*(j\bar{\omega})} = 1 - W_R^*(j\bar{\omega}) - \frac{1}{W_R^*(j\bar{\omega})}, \quad /8/$$

где

$$W_R^*(j\bar{\omega}) = \frac{s^*(j\bar{\omega})}{e^*(j\bar{\omega})} = \frac{\sum_{i=1}^6 \mu_i \lambda_i \frac{\exp(-\lambda_i T_{и})}{\exp(j\bar{\omega}) - \exp(-\lambda_i T_{и})}}{\sum_{i=1}^6 \mu_i \lambda_i \frac{\exp(-\lambda_i T_{и})}{1 - \exp(-\lambda_i T_{и})}} \quad /9/$$

Передаточная функция /8/ относится к случаю, когда отклонение энергии выражено в относит.ед. Если же его выражать в абсолютных единицах /МДж/, то

$$W_{o.c.}^*(j\bar{\omega}) = \frac{\rho_{o.c.}^*(j\bar{\omega})}{\Delta E^*(j\bar{\omega})} = W_p^*(j\bar{\omega}) \frac{E_{00}}{E_0 P_{00} T_{и}} \quad /10/$$

В формуле /10/ каждому значению $\bar{\omega}$ соответствует свое значение E_0 . Для разных $\bar{\omega}$ значения E_0 несколько отличались друг от друга. E_{00} - то значение E_0 , которое соответствует наиболее высокой частоте $\bar{\omega} = \pi$, а P_{00} - средняя мощность в МВт, соответствующая этому режиму. Результаты расчета $W_{o.c.}^*(j\bar{\omega}) = U^*(\bar{\omega}) + jV^*(\bar{\omega})$, где U^* и V^* - действительная и мнимая части $W_{o.c.}^*$, сведены в таблицу.

N	M	L	f = f _и / M, Гц	$\bar{\omega} = \pi / N$	u*($\bar{\omega}$)	v*($\bar{\omega}$)
1	2	6000	2,5	3,14	0,55	0
2	4	500	1,25	1,57	0,57	0,51
3	6	500	0,83	1,05	0,18	0,77
4	8	500	0,63	0,79	-0,03	1,20
5	10	500	0,50	0,63	-0,39	1,44
6	12	500	0,42	0,52	-0,71	1,55
8	16	500	0,31	0,39	-0,96	1,09
11	22	500	0,23	0,29	-0,62	1,04
16	32	500	0,16	0,20	-0,45	1,08
19	38	500	0,13	0,17	-0,12	1,20
23	46	500	0,11	0,14	0,20	2,16
27	54	500	0,093	0,12	0,45	3,65
32	64	2000	0,078	0,098	0,47	3,07
37	74	250	0,068	0,085	0,38	5,08
42	84	200	0,060	0,075	0,27	8,59
51	102	200	0,049	0,062	-0,36	10,10
67	134	240	0,037	0,047	-1,74	9,64
114	228	1000	0,022	0,028	-7,82	15,17

ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ЗНАЧЕНИЙ ЧАСТОТНОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ НА НИЗКОЙ ЧАСТОТЕ

Колебания с более низкой частотой измерить не удалось. Значения $W_{o.c.}^*(j\bar{\omega})$ для $\bar{\omega} = 0$ и $\bar{\omega} = 0,014$, в два раза меньше, чем наименьшая измеренная, оценивались экстраполяцией. Это осуществлялось следующим образом. Использовались уравнения, связывающие переходную характеристику $w^*(k)$ с действительной $U^*(\bar{\omega})$ и мнимой $V^*(\bar{\omega})$ частями импульсной частотной передаточной функции /8/:

$$w^*(k) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} U^*(\bar{\omega}) \cos(\bar{\omega}k) d\bar{\omega}, \quad /11/$$

$$w^*(k) = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V^*(\bar{\omega}) \sin(\bar{\omega}k) d\bar{\omega}. \quad /12/$$

Уравнение /12/ относится к случаю, когда $w^*(0) = 0$, что и имеет место для импульсного реактора. Помимо 18 пар значений U^*

и V^* , полученных обработкой экспериментальных данных, известно значение $V^*(\bar{\omega}=0) = 0$. Для $\bar{\omega} = 0,014 / N = 228/$ задавалось значение $V^*(\bar{\omega})$ и производились следующие вычисления.

а/ По формуле /12/ вычислялись значения $\omega_V^*(k)$ при $k = 1, \dots, K$, а также

$$h_V^*(k) = \sum_{k=1}^K w_k^*(k). \quad /13/$$

Было принято $K = 200$. Полагали, что между соседними значениями частот, для которых $V^*(\bar{\omega})$ задано, $V^*(\bar{\omega})$ изменяется линейно.

б/ Вычислялось среднее значение $h_V^*(k)$ последних 50 импульсов, которое принималось в качестве установившегося значения $h_V^*(k=\infty)$, равного, как известно, $U^*(\bar{\omega}=0)$.

в/ Задавался ряд значений $U^*(\bar{\omega} = 0,014/)$. Для каждого из них по формуле /11/ для $k = 1, \dots, K$ вычислялись значения $\omega_U^*(k)$ и среднеквадратическое отклонение

$$\Delta w_{\text{ср.кв.}}^* = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (w_U^*(k) - w_V^*(k))^2}. \quad /14/$$

При этом аналогично $V^*(k)$ в качестве $U^*(k)$ принималась кусочно-линейная функция. Запоминалось минимальное значение $\Delta w_{\text{ср.кв.}}^*$ и соответствующее ему $U^*(\bar{\omega} = 0,014)$.

Далее задавалось новое значение $V^*(\bar{\omega} = 0,014)$ и вычисления по пунктам а, б, в повторялись.

В качестве окончательных были приняты те значения $U^*(\bar{\omega})$ и $V^*(\bar{\omega})$, которым соответствовала наименьшая величина $\Delta w_{\text{ср.кв.}}^*$, оказавшаяся равной 0,024:

$U^*(\bar{\omega}) = -20,82$, $V^*(\bar{\omega}) = 13,30$ при $\bar{\omega} = 0,014$,

$U^*(\bar{\omega}) = -25,50$, $V^*(\bar{\omega}) = 0$ при $\bar{\omega} = 0$.

Амплитудно-фазо-частотная характеристика мощностной обратной связи показана на рис.3.

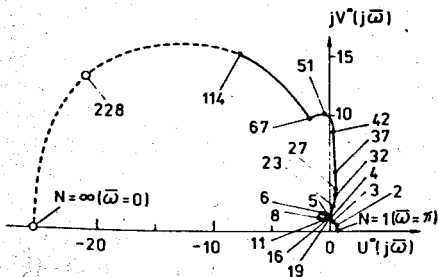


Рис.3. Амплитудно-фазо-частотная характеристика мощностной обратной связи. ●, ○ - значения $W_{\text{о.с.}}^*(j\bar{\omega})$, полученные соответственно из эксперимента и путем экстраполяции.

ИМПУЛЬСНАЯ ПЕРЕХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

По значениям $\omega_U^*(k)$ и $w_V^*(k)$, соответствующим минимуму $\Delta w_{\text{ср.кв.}}^*$, вычислялись среднеарифметические величины

$$w^*(k) = 0,5(w_U^*(k) + w_V^*(k)), \quad /15/$$

которые принимались в качестве значений импульсной переходной характеристики /рис.4/:

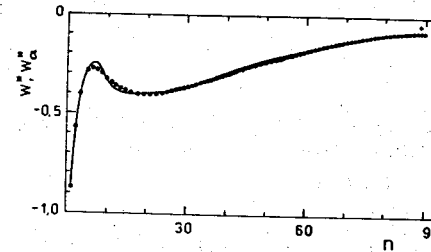


Рис.4. Вычисленная $w^*(k)$ и аппроксимирующая $w_a^*(k)$ импульсные переходные характеристики мощностной обратной связи, $\beta_{\text{и}}/\text{МДж}$. Сплошной линией показана огибающая $w^*(k)$, точками - $w_a^*(k)$.

ПРИЕМЛЕМОСТЬ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ $W_{\text{о.с.}}^*(j\bar{\omega})$

На приемлемость проведенной экстраполяции указывает сравнение значения $U^*(\bar{\omega} = 0)$, полученного при экстраполяции, с аналогичным значением, полученным иным путем. $U^*(\bar{\omega} = 0)$ численно равно отношению уровня скачка задающей реактивности к установившемуся значению энергии импульсов мощности. Были рассмотрены переходные процессы E при наименьшей частоте изменения ρ_3 , когда $N = 114$. В течение первого полупериода $\rho_3 = G$, в течение второго полупериода $\rho_3 = -G$. Полагалось, что к концу каждого полупериода энергия импульсов выходила на установившийся уровень, который определялся по последним $N_0 = 10$ импульсам:

$$E_{\text{уст.}N} = \frac{1}{N_0} \sum_{n=N-N_0+1}^N E(n); \quad E_{\text{уст.}M} = \frac{1}{N_0} \sum_{n=M-N_0+1}^M E(n). \quad /16/$$

Было зарегистрировано $J = 10$ таких процессов /5/. Для каждого j -го процесса были вычислены величины

$$h_{\text{уст.}j}^* = 2G / (E_{\text{уст.}M} - E_{\text{уст.}N})_j,$$

а затем среднеарифметическое значение

$$h_{\text{уст.}}^* = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J h_{\text{уст.}j}^* = -28,0 \beta_{\text{и}}/\text{МДж},$$

которое и было принято в качестве установившегося.

Близость $h_{уст.}^* = -26,0$ и $U^*(\bar{\omega} = 0) = -25,5$ дает дополнительное основание считать удовлетворительной проведенную экстраполяцию $W_{o.c.}^*(j\bar{\omega})$ для низких частот.

Для каждого из 10 таких процессов были вычислены средне-квадратические отклонения:

$$\Delta e_{ср.кв. N} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{n=N-N_0+1}^N \left(\frac{E(n)}{E_{уст. N}} - 1 \right)^2}, \quad /17/$$

$$\Delta e_{ср.кв. M} = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{n=M-N_0+1}^M \left(\frac{E(n)}{E_{уст. M}} - 1 \right)^2}. \quad /18/$$

Наибольшее из всех вычисленных таким образом значений, равное 0,01, может служить оценкой погрешности при измерении энергии импульсов.

Для импульсного реактора $w^*(k=0) = 0$. Однако из формулы /11/ получилось, что

$$w^*(k) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} U^*(\bar{\omega}) d\bar{\omega} = 0,1.$$

Эта величина может служить оценкой наибольшей погрешности вычисления $w^*(k)$.

АППРОКСИМАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОЩНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Из рис.4 видно, что огибающая импульсной переходной характеристики может быть описана аналитически по меньшей мере тремя дифференциальными уравнениями первого порядка. С учетом этого мощностная обратная связь представлялась в виде трех параллельно соединенных апериодических звеньев.

Аппроксимирующие частотная передаточная функция и импульсная переходная характеристика представлялись в виде:

$$W_{o.c.}^*(j\bar{\omega}) = \sum_{r=1}^3 \frac{k_r}{T_r} \frac{\exp(-T_n/T_r)}{\exp(j\bar{\omega}) - \exp(-T_n/T_r)}, \quad /19/$$

$$w_a^*(k) = \sum_{r=1}^3 \frac{k_r}{T_r} \exp(-kT_n/T_r), \quad /20/$$

где k_r , T_r - соответственно коэффициент передачи и постоянная времени.

В качестве k_r и T_r принимались те их значения, при которых достигался минимум среднеквадратического отклонения

$$\Delta w_{a \text{ ср.кв.}}^* = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (w^*(k) - w_a^*(k))^2}. \quad /21/$$

По-прежнему принималось $K = 200$.

Поиск минимума осуществлялся по методу Гаусса-Зайделя^{/8/}.

В результате были приняты следующие значения параметров:

$$k_1 = -6,95; \quad k_2 = 2,33; \quad k_3 = -0,64; \quad \beta_n / \text{МДж},$$

$$T_1 = 7,0; \quad T_2 = 2,0; \quad T_3 = 0,4; \quad \text{с.}$$

При этом $\Delta w_{a \text{ ср.кв.}}^* = 0,012 \beta_n / \text{МДж}$, а наибольшее отклонение $(w_a^*(k) - w^*(k))_{\max} = -0,038 \beta_n / \text{МДж}$ при $k = 7$. Близость исходной и аппроксимирующей импульсных переходных характеристик иллюстрирует рис.4.

Представление мощностной обратной связи не тремя, а пятью апериодическими звеньями не дало лучших результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для импульсного реактора ИБР-2, работавшего с частотой 5 имп/с при средней мощности 2 МВт и расходе теплоносителя 90 м³/ч анализировались зарегистрированные значения энергии импульсов мощности при периодических колебаниях уровня реактивности в диапазоне частот от 0,022 до 2,5 Гц.

2. Вычислены 18 значений частотной характеристики мощностной обратной связи путем математической обработки исходных данных и два значения для низких частот путем экстраполяции.

3. Используя связь временной характеристики с частотными, вычислена импульсная переходная характеристика мощностной обратной связи.

4. Импульсная переходная характеристика мощностной обратной связи аппроксимирована тремя экспонентами. Вычислены значения коэффициентов передачи /-6,95; 2,33; -0,64 $\beta_n / \text{МДж}/$ и постоянных времени /соответственно 7; 2; 0,4 с/, при которых достигается наилучшее приближение аппроксимирующей характеристики к исходной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов А.К., Рогов А.Д., Руденко В.Т. - Сообщение ОИЯИ, 13-80-95, Дубна, 1980.
2. Денисов В.Д., Попов А.К., Руденко В.Т. - Сообщение ОИЯИ, Р13-81-656, Дубна, 1981.
3. Пепельшев Ю.Н., Попов А.К., Рогов А.Д. - Сообщение ОИЯИ, Р13-83-471, Дубна, 1983.
4. Попов А.К. - Сообщение ОИЯИ, Р13-84-338, Дубна, 1984.
5. Шабалин Е.П. и др. - Препринт ОИЯИ, Р3-90-29, Дубна, 1990.
6. Попов А.К. - Сообщение ОИЯИ, 13-85-839, Дубна, 1985.
7. Бесекерский В.А., Попов Е.П. - Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975, с.453.
8. Красовский А.А., Поспелов Г.С. - Основы автоматики и технической кибернетики. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962, с.367, 510.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 марта 1990 года.