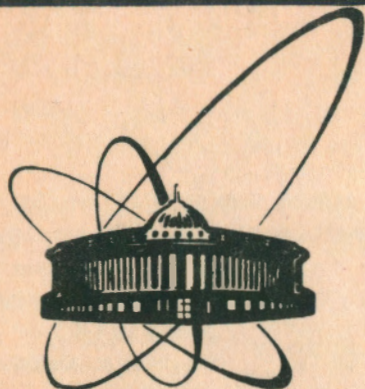


92-551



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P13-92-551

А.К.Попов

ОЦЕНКА ИМПУЛЬСНОЙ ПЕРЕХОДНОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНОЙ ОБРАТНОЙ
СВЯЗИ РЕАКТОРА ИБР-2
ЧАСТОТНЫМ МЕТОДОМ

1992

Оценка импульсной переходной характеристики мощностной обратной связи реактора ИБР-2 частотным методом

Для импульсного реактора ИБР-2 проведены оценки мощностной обратной связи в результате математической обработки замеренного периодического колебания мощности, вызванного периодическим прямоугольным колебанием реактивности. Использован метод частотных характеристик. Обратная связь описана тремя дифференциальными уравнениями первого порядка. Параметры обратной связи подобраны приближением сначала аппроксимирующей частотной характеристики реактора к характеристике, вычисленной путем обработки замеренного переходного процесса мощности, а затем приближением колебания мощности, соответствующего выбранным параметрам, к замеренному колебанию. Показано, что практически одна и та же импульсная переходная характеристика может быть получена при разных наборах параметров обратной связи.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1992

Перевод автора

Popov A.K.

P13-92-551

Frequency Method Estimate of the Pulse Transient Characteristic of Power Feedback in the IBR-2 Reactor

The IBR-2 pulsed reactor power feedback parameters are estimated by means of the frequency analysis of recorded power oscillations caused by reactivity jump oscillations. The feedback is described by three first order differential equations. The feedback parameters were selected, first, by approaching the approximating frequency characteristic of the reactor calculated from the measured data on power transition process and, then, by approximation of power oscillations, corresponding to the selected parameters, to recorded power oscillations. It has been shown that practically one and the same pulse transient characteristic corresponds to different sets of feedback parameters.

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

В работе [1] была дана оценка частотной и импульсной переходной характеристик мощностной обратной связи реактора ИБР-2 посредством математической обработки переходных процессов мощности реактора при периодических ступенчатых колебаниях реактивности в диапазоне частот от 0,022 до 2,5 Гц. Колебания реактивности вызывались периодическими перемещениями автоматического регулятора из одного фиксированного положения в другое за время между соседними импульсами мощности (рис.1). Преднамеренно изменяемую реактивность принято называть задающей. На рис.1 она обозначена ρ_3 . Поскольку энергия импульса зависит от реактивности экспоненциально, то амплитуда колебаний реактивности R (рис.1) была выбрана достаточно малой. В результате этого отклонение энергии импульсов мощности E от среднего уровня E^0 (т.е. $\Delta E = E - E^0$) вверх не намного превышало соответствующее отклонение вниз (по модулю). Количество периодов колебаний на разных частотах составляло величину от 200 до 6000. Причем на каждой частоте замеры колебаний мощности регистрировались несколько раз. В течение всего этого времени реактор работал с отключенной системой автоматического регулирования, т.е. в режиме саморегулирования. Осуществление колебаний реактивности в таком широком диапазоне частот требует много времени и связано с определенными техническими трудностями при высоких частотах и с необходимостью отделения влияния периодических колебаний при низких частотах от имеющих место медленных неперiodических изменений реактивности.

При периодическом скачкообразном изменении реактивности в колебаниях мощности присутствуют все нечетные гармоники в диапазоне до $\bar{\omega} = \pi$ (т.е. $f = 2,5$ Гц), начиная от первой $\bar{\omega}_1 = \pi/N$, где N — число импульсов за полпериода

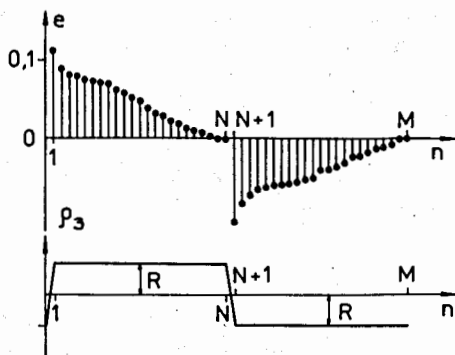
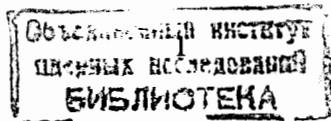


Рис.1. Периодические колебания отклонения энергии импульсов мощности от ее среднего значения (e) и задающей реактивности (ρ_3) при $N = 23$ (n — номер импульса)



да, $f, \bar{\omega} = \omega T_n, \omega = 2\pi f$ — соответственно частота (в Гц) и круговая частота (в относительных единицах и в рад/с), а T_n — период импульсов мощности (в с). Поэтому в отличие от [1] в настоящей работе характеристики реактора оценены по замерам колебаний мощности, соответствующих лишь одной частоте скачкообразного изменения реактивности.

Изменение мощности в течение периода, которое использовалось в расчетах, было получено усреднением по всем зарегистрированным периодам. Если на данной частоте регистрировались несколько реализаций колебаний мощности, то усреднение проводилось и по числу реализаций. На рис.1 показано относительное отклонение энергии e от среднего уровня

$$e = \Delta E / E^0 = E / E^0 - 1 \quad (1)$$

при $N = 23$.

Чтобы использовать в дальнейшем частотный метод, применимый к линейным системам, относительное отклонение энергии e приводилось к симметричной периодической функции \bar{e} . Для этого значения \bar{e} в первом и втором полупериодах принимались, исходя из соотношения:

$$\bar{e}_n = -\bar{e}_{n+N} = 0,5(e_n - e_{n+N}). \quad (2)$$

В замеренных последовательностях энергии импульсов мощности всегда присутствуют составляющие достаточно высокой частоты, не обусловленные органами управления реактора. Это наблюдается как при намеренном изменении реактивности, так и без него. Поэтому значения \bar{e} при n от 2 до $N - 1$ (а следовательно, и при n от $N + 2$ до $M - 1$) сглаживались и заменялись значениями

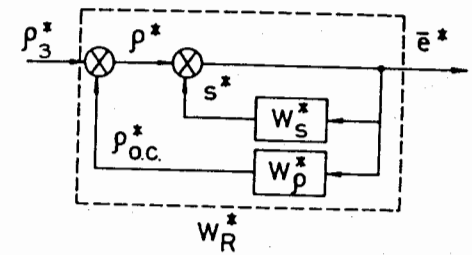
$$\bar{e}_n = 0,25(\bar{e}_{n-1} + 2\bar{e}_n + \bar{e}_{n+1}). \quad (3)$$

Затем по этой же формуле уже сглаженные значения \bar{e} при n от 3 до $N - 2$ сглаживались еще раз. Полученные таким образом относительные отклонения энергии и принимались в качестве исходных для дальнейших расчетов и обозначались вновь \bar{e} . Среднеквадратическое отклонение последовательности \bar{e} от e за период при $N = 23$ составило $3,4 \cdot 10^{-3}$. Для оценки амплитуды задающей реактивности R использовалось соотношение, справедливое при не очень больших отклонениях реактивности

$$1 + \bar{e}_n = A S_n \exp \rho_n, \quad (4)$$

где A — некая константа, ρ — результирующая реактивность реактора, S — значение интенсивности источников запаздывающих нейтронов перед началом развития импульса мощности.

Рис.2. Структурная схема импульсного реактора



Принималось, что значения S , соответствующие соседним импульсам, одинаковы, а реактивность обратной связи, обусловленная e_n , проявит себя лишь в последующих импульсах.

С учетом этих допущений амплитуда задающей реактивности вычислялась по формуле:

$$R = 0,5 \ln [(1 + \bar{e}_1) / (1 - \bar{e}_N)]. \quad (5)$$

Размерностью вычисленной таким образом реактивности является импульсная доля запаздывающих нейтронов β_n .

Структурная схема импульсного реактора, рассматриваемого при малых отклонениях переменных как линейная система, была приведена к виду, показанному на рис.2. При этом использованы следующие обозначения: $\rho^*, \rho_{0.c}^*$ — результирующая реактивность и реактивность мощностной обратной связи, обусловленная разогревом реактора, s^* — относительное отклонение интенсивности источников запаздывающих нейтронов от его среднего значения, вычисляемое по формуле, аналогичной (1); W_R^*, W_S^*, W_ρ^* — частотные импульсные передаточные функции соответственно реактора, блока запаздывающих нейтронов и мощностной обратной связи.

В импульсном реакторе практически вся энергия выделяется в течение импульсов. Длительность их столь мала, что правомерно описывать их дельта-функциями. Поэтому при расчетах представляют интерес значения переменных лишь в дискретные моменты времени. Чтобы подчеркнуть это, обозначения переменных (s^*, \bar{e}^*, \dots), их фурье-изображений ($s^*(j\bar{\omega}), \bar{e}^*(j\bar{\omega}), \dots$), а также частотных передаточных функций ($W_S^*(j\bar{\omega}), W_\rho^*(j\bar{\omega}), \dots$) помечены звездочками.

Для частоты $\bar{\omega} = \bar{\omega}_1 = \pi / N$, а также для нечетных частот $3\bar{\omega}_1, 5\bar{\omega}_1$ и т.д. в диапазоне до $\bar{\omega} = \pi$ вычислялись частотные передаточные функции [1]:

$$W_S^*(j\bar{\omega}) = \frac{s^*(j\bar{\omega})}{e^*(j\bar{\omega})} = \sum_{i=1}^6 \mu_i \lambda_i \frac{\exp(-\lambda_i T_n)}{\exp(j\bar{\omega}) - \exp(-\lambda_i T_n)} / \sum_{i=1}^6 \mu_i \lambda_i \frac{\exp(-\lambda_i T_n)}{1 - \exp(-\lambda_i T_n)}, \quad (6)$$

где λ_i, μ_i — соответственно постоянная распада и относительная доля i -й группы ($i = 1, \dots, 6$) запаздывающих нейтронов (их значения были приняты следующими: $\lambda_i = 0,0129; 0,0311; 0,134; 0,331; 1,26; 3,21, \mu_i = 0,038; 0,28; 0,216; 0,328; 0,103; 0,035$),

$$W_R^*(j\bar{\omega}) = \frac{\bar{e}^*(j\bar{\omega})}{\rho_3^*(j\bar{\omega})} = \frac{\sum_{n=1}^N \bar{e}_n \exp[-j\bar{\omega}(n-1)]}{\sum_{n=1}^N R \exp[-j\bar{\omega}(n-1)]} \quad (7)$$

(В силу симметричности рассматриваемых периодических функций суммирование производилось по полупериоду.)

Из структурной схемы (рис.2) следует, что

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

Если отклонение энергии выражать не в относительных единицах (\bar{e}), а в абсолютных (ΔE) — в МДж, то передаточная функция обратной связи пропорциональна выражению (8) и имеет вид

$$W_{o.c.}(j\bar{\omega}) = \frac{\rho_{o.c.}^*(j\bar{\omega})}{\Delta E^*(j\bar{\omega})} = W_\rho^*(j\bar{\omega}) \cdot \frac{1}{E^0} = [1 - W_s^*(j\bar{\omega}) - 1/W_R^*(j\bar{\omega})] / E^0. \quad (9)$$

Частотная передаточная функция реактора выражается следующим образом:

$$W_R^*(j\bar{\omega}) = \frac{1}{1 - W_s^*(j\bar{\omega}) - W_\rho^*(j\bar{\omega})} = \frac{1}{1 - W_s^*(j\bar{\omega}) - E^0 W_{o.c.}^*(j\bar{\omega})}. \quad (10)$$

Ставилась задача описать мощностную обратную связь тремя дифференциальными уравнениями первого порядка, т.е. структурно представить в виде трех параллельно соединенных апериодических звеньев и наилучшим образом подобрать их параметры. Частотная передаточная функция, соответствующая этому случаю, имеет вид:

$$W_{o.c.a}^*(j\bar{\omega}) = \sum_{r=1}^3 \frac{k_r}{T_r} \frac{\exp(-T_n/T_r)}{\exp(j\bar{\omega}) - \exp(-T_n/T_r)}. \quad (11)$$

Здесь индекс a подчеркивает, что эта частотная передаточная функция является аппроксимирующей. На первом этапе значения параметров T_r и k_r

подбирались так, чтобы наилучшим образом приблизить аппроксимирующую частотную передаточную функцию реактора

$$W_{Ra}^*(j\bar{\omega}) = \frac{1}{1 - W_s^*(j\bar{\omega}) - E^0 W_{o.c.a}^*(j\bar{\omega})} \quad (12)$$

к частотной передаточной функции $W_R^*(j\bar{\omega})$ (10). При этом $W_{Ra}^*(j\bar{\omega})$ должна была удовлетворять следующим условиям.

Во-первых, она должна была совпадать с $W_R^*(j\bar{\omega})$ на самой низкой частоте $\bar{\omega} = \bar{\omega}_1 = \pi/N$.

Во-вторых, действительная часть $W_{Ra}^*(j\bar{\omega})$ на самой высокой нечетной частоте в рассматриваемом диапазоне частот от π/N до π должна была совпадать с $W_{Ra}^*(j\bar{\omega})$ при $\bar{\omega} = \pi$. При четном N наивысшая нечетная частота $\bar{\omega}_{\max} = \pi(N-1)/N$ близка к π , а при нечетном N $\bar{\omega}_{\max} = \pi$. Таким образом, шесть значений параметров T_r, k_r связаны уравнениями:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} W_{Ra}^*(j\bar{\omega}_1) &= \operatorname{Re} W_R^*(j\bar{\omega}_1), \\ \operatorname{Im} W_{Ra}^*(j\bar{\omega}_1) &= \operatorname{Im} W_R^*(j\bar{\omega}_1), \\ \operatorname{Re} W_{Ra}^*(j\bar{\omega}_{\max}) &= \operatorname{Re} W_R^*(j\bar{\omega}_{\max}). \end{aligned} \quad (13)$$

В-третьих, сумма квадратов отклонений $(W_{Ra}^*(j\bar{\omega}) - W_R^*(j\bar{\omega}))^2$ на промежуточных частотах должна была быть наименьшей. Число частот, для которых вычислялась эта сумма, принималось различным. В частности, рассматривался и случай, когда вычислялся квадрат отклонений лишь на одной самой малой из всех промежуточных частот $3\bar{\omega}_1$. Оказалось, что этот случай дает результаты, наилучшим образом приближающиеся к результатам, которые были получены в работе [1] путем математической обработки набора процессов, соответствующих широкому диапазону частот колебаний мощности. Этому можно дать следующее объяснение. В используемом для расчетов переходном процессе полупериод колебаний мощности, и так не очень продолжительный, соизмерим с наибольшей постоянной времени обратной связи. Поэтому повышение числа частот, используемых при аппроксимации, понижает удельный вес низких частот, которых и так мало в исходном замеренном процессе колебаний мощности.

На рис.3 изображены вычисленные по формуле (7) значения $W_R^*(j\bar{\omega})$ для $N = 32, 23, 19$. Там же пунктиром намечена огибающая частотных характеристик реактора. Из рис.3 видно, что при не очень продолжительном

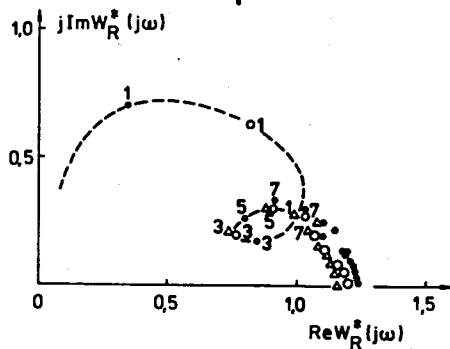


Рис.3. Значения амплитудно-фазо-частотной характеристики реактора, вычисленные для $N = 32$ (\bullet), 23 (\circ), 19 (Δ). Цифрами помечены кратности частот относительно первой гармоники. Пунктиром намечена огибающая частотной характеристики

полупериоде ($N = 19$) утрачивается существенная информация о ходе частотной характеристики на низких частотах, и это не позволяет использовать ее для расчетов по излагаемой методике.

Были вычислены наборы параметров мощностной обратной связи T_r и k_r для различных значений одной из постоянных времени (наибольшей). Для каждого из этих наборов вычислялись колебания энергии импульсов E_a при заданных колебаниях реактивности ρ_3 , а также сумма квадратов отклонений

$$\sigma^2 = \sum_{n=1}^M (e_{an} - \bar{e}_n)^2. \quad (14)$$

Здесь $e_a = E_a/E^0 - 1$. Наконец, из всех наборов выбирался один набор T_r и k_r , которому соответствовала наименьшая сумма квадратов σ^2 . Для этого набора параметров вычислялась импульсная переходная характеристика аппроксимированной мощностной обратной связи

$$w_{ak}^* = \sum_{r=1}^3 \frac{k_r}{T_r} \exp(-kT_n/T_r), \quad (15)$$

т.е. такое изменение во времени реактивности обратной связи, которое наблюдалось бы, если бы отклонение энергии в момент $n = 0$ представляло собой одиночный импульс величиной в 1 МДж.

На рис.4 показана вычисленная таким образом импульсная переходная характеристика мощ-

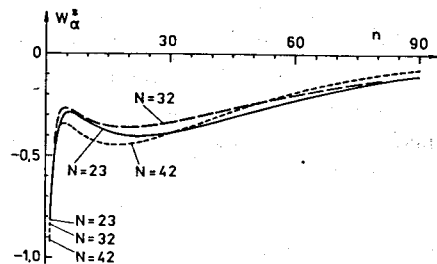


Рис.4. Импульсные переходные характеристики мощностной обратной связи (огибающие — β_n /МДж), вычисленные для $N = 23, 32, 42$.

ностной обратной связи, соответствующая $N = 23$. Параметры ее получились следующими: постоянные времени $T_1 = 0,3$ с; $T_2 = 3,9$ с; $T_3 = 6,3$ с, коэффициенты передачи (β_n /МВт) $k_1 = -0,4$; $k_2 = 8$; $k_3 = -13,4$. Среднеквадратическое относительное отклонение $\sigma/(E^0\sqrt{N})$ составило величину $1,63 \cdot 10^{-3}$. Вычисленная амплитуда задающей реактивности $R = 0,0527 \beta_n$.

Следует отметить, что наборы параметров, соответствующие иным значениям σ^2 , несильно отличающимся от минимальной суммы квадратов, могли заметно отличаться от параметров, соответствующих минимальной σ^2 . Однако это не приводило к существенным отличиям в импульсных переходных характеристиках, которые соответствовали этим наборам параметров.

Так, набору параметров $T_r = 0,3; 3,6; 6,6$ (с) и $k_r = -0,4; 5,8; -11,2$ (β_n /МВт) соответствует практически та же импульсная переходная характеристика.

При больших периодах колебаний ($N = 32, 42$) наблюдалась аналогичная связь между параметрами и импульсной переходной характеристикой. Эти характеристики на рис.4 показаны пунктиром.

Таким образом, возможные со временем изменения в мощностной обратной связи лучше оценивать не изменением значений параметров T_r, k_r , а изменением самого вида импульсной переходной характеристики.

Число импульсов мощности в полупериоде N должно быть выше некоторого уровня, чтобы не утрачивалась информация о характере частотной характеристики реактора на низких частотах.

Поскольку в расчетах используются первая и третья гармоники, целесообразно, чтобы число N было кратным трем. Наибольшее отклонение оценочных импульсных переходных характеристик, вычисленных по рассмотренной методике (рис.4), от соответствующей характеристики, вычисленной в [1], составило $0,13 \beta_n$ /МДж в районе $n = 6$. Такое расхождение можно объяснить тем, что формула (5) относится к случаю, когда до изменения реактивности мощность стабильна. При колебаниях мощности с не очень продолжительными периодами применение формулы (5) может дать заметную ошибку. Так, при $N = 23; 32; 42$ формула (5) дала соответственно значения задающей реактивности $R = 0,0527; 0,0515; 0,0486 \beta_n$. В то же время при $N = 114$, как следует из [1], $R = 0,0542 \beta_n$.

Расчеты проведены для режимов работы реактора в декабре 1988 г. со средней мощностью 2 МВт при частоте импульсов мощности 5 имп/с

($T_{и} = 0,2$ с) и расходе теплоносителя (натрия) через активную зону $90 \text{ м}^3/\text{час}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов А.К. — Сообщение ОИЯИ Р13-90-203, Дубна, 1990.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 декабря 1992 года.