

P13-2006-101

Ю. Н. Пепельшев, А. К. Попов

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОЩНОЙ
ОБРАТНОЙ СВЯЗИ И УСТОЙЧИВОСТИ
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА **ИБР-2** ПРИ
РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Направлено в журнал «Атомная энергия»

Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.

P13-2006-101

Оценка параметров мощностной обратной связи и устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при различных уровнях средней мощности

Проведены экспериментальные и модельные исследования параметров быстрой мощностной обратной связи (МОС) в зависимости от мощности импульсного реактора ИБР-2. Исследовались переходные процессы мощности, вызванные прямоугольными колебаниями внешней реактивности. Дана оценка изменения параметров МОС в диапазоне средней мощности реактора от 0,5 до 1,5 МВт. Приведено сравнение полученных результатов с данными экспериментов 1984–1996 гг. Отмечено, что влияние МОС с течением времени работы реактора уменьшается. Модель реактора с параметрами МОС, соответствующими одной серии экспериментов, исследована частотным методом на устойчивость. Показано, что в районе штатного уровня средней мощности 1,5 МВт реактор в режиме саморегулирования (т. е. без автоматического регулятора) обладает достаточным запасом устойчивости.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Pepelyshev Yu. N., Popov A. K.

P13-2006-101

Estimation of the Parameters of Power Feedback and Stability of the IBR-2 Pulsed Reactor at Different Levels of the Mean Power

The experimental and modeling investigations of fast power feedback (PF) parameters depending on the power of the IBR-2 pulsed reactor have been carried out. The transient processes of power, induced by the rectangular oscillations of the external reactivity have been investigated. The estimation of the PF parameters change has been obtained in the range of the reactor mean power from 0.5 to 1.5 MW. The results obtained are presented as compared to the data measured earlier in the experiments of 1984–1996. It is registered that the influence of PF decreases in the course of reactor operation time. The model of the reactor with the PF parameters, corresponding to the one series of experiments, has been investigated for stability by the frequency method. It is shown that in the region of normal level of the mean power 1.5 MW, the reactor being in the self-regulation regime (i. e. without an automatic regulator), possesses the sufficient stability margin.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2006

ВВЕДЕНИЕ

Динамические свойства реактора ИБР-2 во многом определяются характером обратных связей, действующих на достаточно малых интервалах времени, сравнимых с периодом повторения импульсов мощности, т. е. от долей секунды до нескольких секунд. В процессе работы реактора основные параметры обратных связей (амплитуда и характерные времена) могут меняться. Кроме того, не исключена и зависимость обратных связей от мощности. Все это создает достаточно сложный портрет динамики реактора не только в переходных процессах (например, при подъеме или снижении мощности), но и в стационарном состоянии на постоянной мощности. В работе исследованы параметры быстрых обратных связей для одного из основных штатных режимов работы реактора, а именно для мощности 1,5 МВт и расхода натрия через активную зону 90 м³/ч. Большое внимание уделялось также изучению характеристик обратных связей в диапазоне средней мощности реактора от 0,5–1,5 МВт. Дополнительно, для сравнения, использовались результаты измерений, полученные при работе реактора на мощности 2 МВт в период с 1984 по 1996 г.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РЕАКТОРА ИБР-2

Импульсный режим работы реактора ИБР-2 обеспечивался благодаря прохождению мимо активной зоны с топливом из двуокиси плутония двух подвижных отражателей, вращающихся с разной скоростью. Основной подвижный отражатель (ОПО), выполненный в виде лопасти, создавал импульсы реактивности большой амплитуды ($\sim 2,5 \cdot 10^{-2}$). Благодаря дополнительному подвижному отражателю (ДПО), выполненному в виде трезубца, реактивность каждого пятого импульса увеличивалась на величину $\sim 6,45 \cdot 10^{-3}$ (эффективность ДПО), в результате чего реактор в течение ~ 400 мкс находился в надкритическом состоянии на мгновенных нейтронах. Реактивность в импульсе достигала наибольшего значения, равного $\varepsilon_m \approx 1 \cdot 10^{-3}$. В результате

реактор генерировал нейтронные импульсы большой амплитуды (импульсы мощности) с периодом $T_{и} = 0,208$ с (рис. 1). Длительность импульсов мощности на половине высоты составляла 215 мкс. Охлаждение реактора осуществлялось с помощью жидкого натрия, прокачиваемого через активную зону, с расходом, регулируемым в диапазоне от 80 до 120 м³/ч. Реактор до середины 1997 г. работал на мощности 2 МВт, затем (по плану до конца 2006 г.) — на мощности 1,5 МВт.

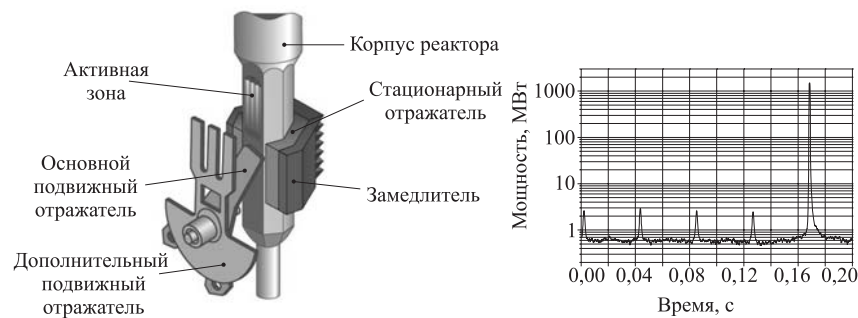


Рис. 1. Схема реактора ИБР-2 с подвижным отражателем ПО-2М и изменение мощности реактора за период при средней мощности 2 МВт. Основной подвижный отражатель — лопасть, дополнительный подвижный отражатель — трезубец

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для изучения обратных связей реактора в быстрых процессах регистрировалась последовательность энергии импульсов мощности под воздействием периодической модуляции внешней реактивности. Для оценки зависимости обратных связей от средней мощности реактора была проведена серия экспериментов в диапазоне мощности от $\sim 0,5$ до $\sim 1,5$ МВт. Дополнительно для анализа устойчивости реактора исследовались и шумы энергии импульсов мощности. Изучались их спектральные характеристики и особенно уровень колебаний в низкочастотной области спектра (менее 0,1 Гц). Модуляция реактивности в процессе экспериментов проводилась на реакторе, работавшем в режиме саморегулирования, т. е. без автоматического регулятора (АР). АР был выведен из контура регулирования и использовался в качестве задатчика периодических прямоугольных колебаний реактивности. Нужно отметить, что, как показывает анализ экспериментальных данных по оценке МОС, проводимой

периодически за длительное время работы реактора, параметры МОС существенно зависят от энергонаработки. Поэтому мощностная зависимость МОС оценивалась в одном цикле измерений, когда изменением энергонаработки можно было пренебречь. Все эксперименты проведены при одинаковых условиях: расход теплоносителя через активную зону — $90 \text{ м}^3/\text{ч}$; период импульсов мощности — $0,208 \text{ с}$; количество импульсов мощности за период прямоугольных колебаний реактивности — 160 ; амплитуда задающей реактивности — $0,0365 \beta_{\text{и}}$. Переходные процессы изменения мощности за период модуляции реактивности при некоторых значениях средней мощности приведены на рис. 2. Эти процессы обрабатывались по специальной программе поиска

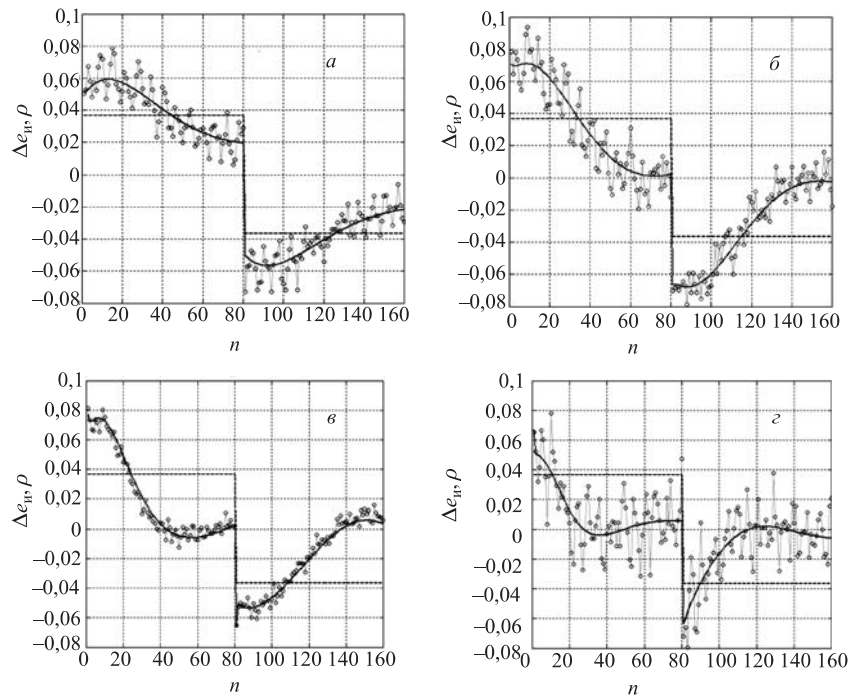


Рис. 2. Относительное отклонение энергии импульса $\Delta \epsilon_{и}$ при прямоугольных колебаниях реактивности $\rho = \pm 0,0365 \beta_{и}$ для различных уровней средней мощности: а) 0,465 МВт; б) 0,920 МВт; в) 1,415 МВт; г) 1,475 МВт. Точками помечены зарегистрированные относительные отклонения энергии импульса мощности от среднего значения, сплошными линиями — вычисленные по модели динамики реактора. n — номер импульса мощности

параметров МОС и определения импульсной характеристики реактора. Импульсные характеристики представляют собой изменение реактивности МОС под воздействием одного импульса мощности в виде дельта-функции, т.е. бесконечно узкого импульса единичной площади (1 МДж). Краткое описание модели мощностной обратной связи, используемой при обработке экспериментальных данных, приведено в разд. 3.2. На рис. 3 показаны импульсные переходные характеристики линейризованной МОС (параметры нелинейности коэффициентов передачи приравнены к нулю). Вычисленные параметры МОС сведены в таблицу.

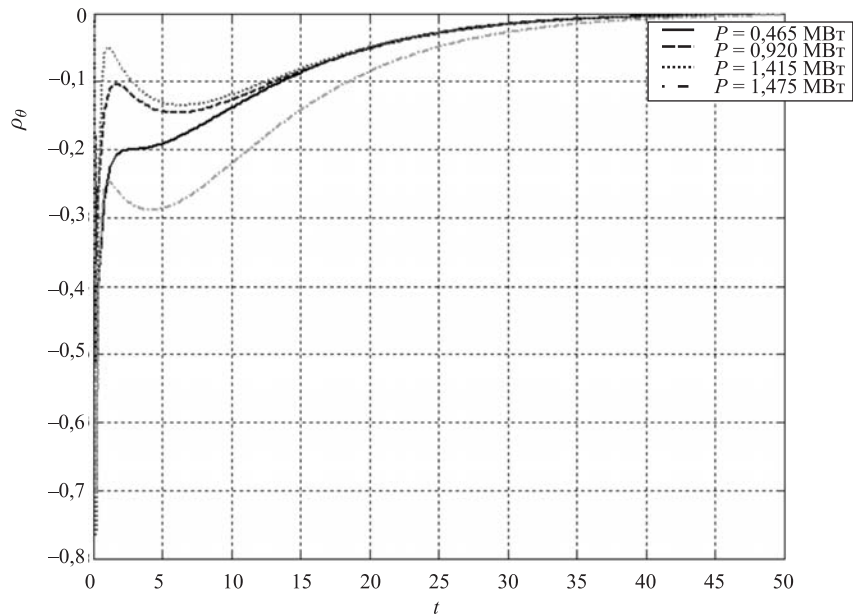


Рис. 3. Импульсные переходные характеристики линейризованной МОС при некоторых значениях средней мощности реактора: зависимость реактивности ρ_θ (β_n) от времени t (с) при единичном импульсе мощности на входе МОС

Параметры мощностной обратной связи при некоторых значениях средней мощности P

Средняя тепловая мощность P , МВт				
	0,465	0,920	1,415	1,475
Коэффициенты передачи мощностной обратной связи, β_n /МВт				
$k_{\theta 1}$	-7,3	-7,0	-6,1	-8,9
$k_{\theta 2}$	4,2	4,5	3,8	4,1
$k_{\theta 3}$	-0,25	-0,25	-0,44	-0,29
$\sum k_{\theta j}$	-3,35	-2,75	-2,74	-5,09
Постоянные времени МОС, с				
$T_{\theta 1}$	7,5	7,7	7,9	8,3
$T_{\theta 2}$	5,2	5,0	4,8	4,6
$T_{\theta 3}$	0,47	0,47	0,19	0,22
Параметры нелинейности коэффициентов передачи, β_n^{-1}				
c_1	-0,09	-0,04	-0,10	-0,39
c_2	0,3	-0,1	1,5	1,1
c_3	2,1	2,2	-9,9	18,5

3. МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ И МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ИБР-2

Для оценки устойчивости реактора в зависимости от мощности использовалась модель динамики реактора [5, 6]. Введенные в модель значения параметров МОС получены в результате математической обработки зарегистрированных переходных процессов. В модели динамики использовался широкий набор программ для моделирования переходных процессов мощности реактора и вычисления частотных характеристик реактора как системы в целом, так и составляющих его элементов. Ниже представлено краткое описание модели.

3.1. Модель кинетики реактора. Для описания кинетики реактора использована одноточечная модель. Уравнения кинетики приведены к виду

$$\frac{\tau}{\beta} \frac{dP}{dt} = \frac{\varepsilon}{\beta} + S; \quad S = \sum_{i=1}^6 S_i; \quad T_i \frac{dS_i}{dt} + S_i = \mu_i P,$$

где $i = 1, \dots, 6$ — номер группы запаздывающих нейтронов; P — мощность реактора; $\mu_i = \beta_i/\beta$ — доля запаздывающих нейтронов группы i (β_i),

отнесенная к суммарной доле запаздывающих нейтронов ($\beta = \sum_i \beta_i$); τ — эффективное время жизни мгновенных нейтронов; T_i — постоянная времени запаздывающих нейтронов группы i , равная обратной величине постоянной распада λ_i источников запаздывающих нейтронов ($T_i = 1/\lambda_i$); ε — реактивность на мгновенных нейтронах; S_i, S — соответственно интенсивность запаздывающих нейтронов группы i и суммарная (выражены в единицах мощности); t — время. В качестве регулируемого параметра реактора ИБР-2 принята относительная амплитуда импульса мощности, которая практически равна энергии импульса мощности E_n , отнесенной к заданному (базовому) значению E_n^0 . Энергия импульса мощности зависит от S перед началом развития импульса реактивности и импульсного коэффициента передачи [1]:

$$E_n = MS.$$

M является нелинейной функцией от максимальной реактивности в импульсе ε_n [2]. В рабочем диапазоне зависимость M от ε_n можно с хорошей точностью аппроксимировать экспонентой. Энергия импульса мощности в долях от базового значения описана уравнением

$$\frac{E_n}{E_n^0} = \frac{S}{S^0} \frac{M}{M^0} = \frac{S}{S^0} \exp(\ln M - \ln M^0).$$

Здесь и далее базовые (средние) значения параметров помечены индексом 0.

В реакторе ИБР-2 основная доля энергии за период выделяется в импульсе мощности. Энергия фона E_ϕ (энергия, выделяемая между импульсами) составляет примерно 7% от полной энергии за период $E = E_n + E_\phi$. Энергия фона в долях от базового значения полной энергии с достаточной точностью описана выражением

$$\frac{E_\phi}{E^0} = k_\phi \frac{S}{S^0},$$

где коэффициент пропорциональности

$$k_\phi = \frac{\beta T_n}{\Delta K_{MP} - \varepsilon_m} \frac{S^0}{E^0} \approx \frac{\beta T_n}{\Delta K_{MP} - \varepsilon_m^0} \frac{S^0}{E^0}$$

является практически постоянной величиной, поскольку в процессе работы изменением ε_m можно пренебречь по сравнению с большой суммарной эффективностью ОПО и ДПО $\Delta K_{MP} \approx 3,145 \cdot 10^{-2}$. В модели реактора ИБР-2, предназначенной для исследования его динамики, использованы отклонения переменных от их базовых значений

$$\Delta E_n = E_n - E_n^0, \quad \Delta E = E - E^0, \quad \Delta S_i = S_i - S_i^0, \quad \Delta S = S - S^0$$

и относительные отклонения переменных

$$\Delta e_n = \Delta E_n / E_n^0, \quad \Delta e = \Delta E / E^0, \quad \Delta s_i = \Delta S_i / S^0, \quad \Delta s = \sum_i \Delta s_i = \Delta S / S^0.$$

Помимо реактивности ε , выраженной в абсолютных единицах, удобно использовать реактивность, выраженную в импульсных долях запаздывающих нейтронов β_n [3], которая для ИБР-2 равна $\beta_n = 1,6 \cdot 10^{-4}$. Ниже для реактивности в долях β_n использовано обозначение ρ .

3.2. Модель мощностной обратной связи. Мощностная обратная связь (МОС) представлена в виде суммы трех составляющих [4]. Каждая составляющая формируется на выходе соответствующего канала в виде аperiodического (инерционного) звена. Входной величиной каждого j -го канала МОС ($j = 1, 2, 3$) является отклонение энергии импульса мощности от его базового (среднего) значения Δ . В качестве выходной величины для удобства принята реактивность в долях β_n ($\rho_{\theta j}$). МОС каждого канала описана уравнением, связывающим значения $\rho_{\theta j}$ в моменты времени, соответствующие импульсам мощности с номерами n и $n - 1$:

$$\rho_{\theta j n} = \left(\rho_{\theta j n-1} + \Delta E_{n-1} \frac{k_{\theta j n}}{T_{\theta j}} \right) \exp \left(- \frac{T_n}{T_{\theta j}} \right).$$

Коэффициенты передачи $k_{\theta j}$ приняты зависимыми от реактивности МОС. Коэффициент передачи с наибольшей постоянной времени принят линейно зависимым от составляющей МОС $\rho_{\theta 1}$, обусловленной именно этой составляющей, поскольку предполагается, что этот коэффициент передачи зависит от температуры топлива:

$$k_{\theta 1 n} = k_{\theta 1 n-1} (1 + c_1 \rho_{\theta 1 n-1}).$$

Два других коэффициента передачи приняты линейно зависимыми от суммарной реактивности МОС $\rho_{\theta} = \sum_1^3 \rho_{\theta j}$, поскольку предполагается, что на эти коэффициенты влияют многие факторы, обусловленные разогревом не только топлива:

$$k_{\theta j n} = k_{\theta j n-1} (1 + c_j \rho_{\theta n-1})$$

(здесь $j = 2, 3$).

Принятая модель МОС характеризуется, таким образом, девятью параметрами: тремя коэффициентами передачи $k_{\theta j}$, тремя постоянными времени $T_{\theta j}$ и тремя параметрами нелинейности c_j , где $j = 1, 2, 3$.

4. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для исследования динамики реактора использовался частотный метод. Реактор ИБР-2 без автоматического регулятора (АР) представлен в виде линеаризованной замкнутой одноконтурной системы с отрицательной обратной связью (рис. 4, а). В связи с этим в канал обратной связи (рис. 4, б), содержащий блок запаздывающих нейтронов и блок МОС, введены инвер-

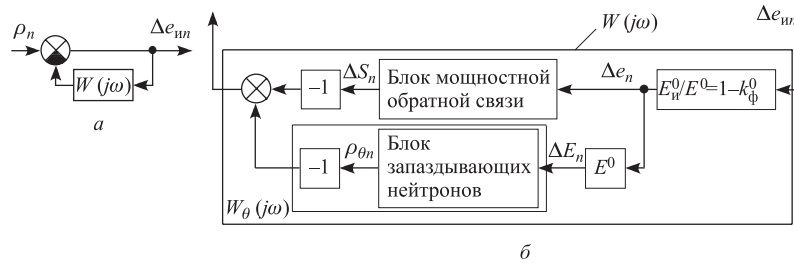


Рис. 4. Линеаризованная модель реактора ИБР-2 для режима саморегулирования, представленная в виде одноконтурной замкнутой системы (а), и канал обратной связи (б): $W(j\omega)$, $W_\theta(j\omega)$ — частотная передаточная функция канала обратной связи и входящего в него блока МОС соответственно; индекс n обозначает номер импульса мощности

торы. Устойчивость замкнутой одноконтурной системы удобно оценивать по критерию Найквиста. Для этого необходимо исследовать разомкнутую часть системы, получающуюся при разрыве контура на рис. 4, а. Очевидно, что частотная передаточная функция обратной связи одновременно является частотной передаточной функцией разомкнутой системы. В качестве входной величины системы принято $\rho = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_m^0}{\beta_n}$ — отклонение реактивности от ее базового значения в долях β_n , а в качестве выходной Δe_n — относительное отклонение энергии импульсов мощности от его базового значения. Для частотного анализа канал суммарной обратной связи описан дискретной передаточной функцией $W(z)$, полученной в результате z -преобразования переменных. Частотная импульсная передаточная функция разомкнутой системы $W(j\omega)$ получена из $W(z)$ путем подстановки $z = \exp(j\omega T_n)$. Аналогично получена частотная импульсная передаточная функция блока мощностной обратной связи $W_\theta(j\omega)$.

На рис. 5 для различных уровней средней мощности показаны амплитудно-фазовые частотные характеристики, а на рис. 6 — логарифмические частотные характеристики разомкнутой части системы.

На рис. 5 показаны частотные характеристики для всего диапазона частот f от 0 до $0,5/T_n$ (где $T_n = 0,208$ с — период импульсов мощности), что

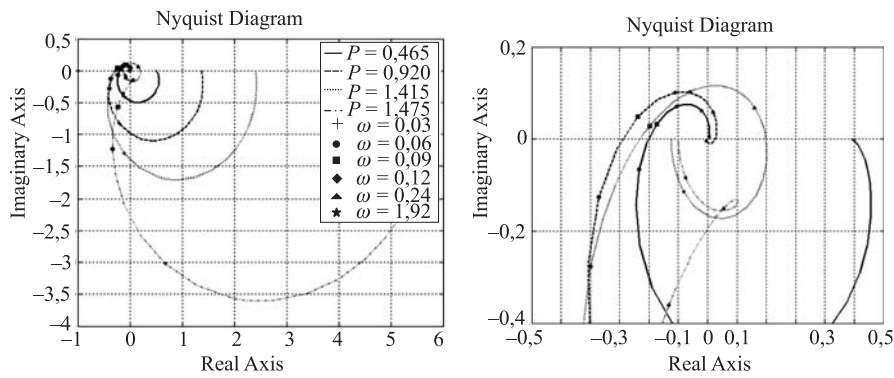


Рис. 5. Амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой части системы $W(j\omega)$ на комплексной плоскости

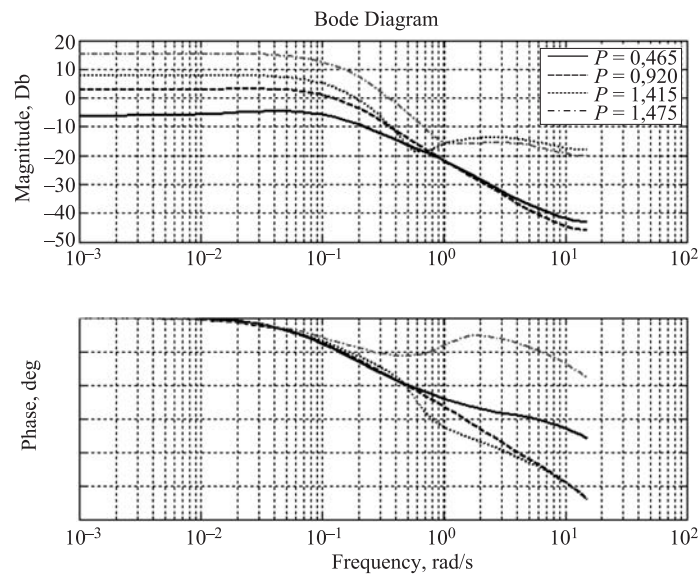


Рис. 6. Амплитудные ($L(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)|$) и фазовые ($\phi(\omega) = \arg W(j\omega)$) логарифмические частотные характеристики разомкнутой части системы

соответствует диапазону безразмерных частот $\omega T_n = 2\pi f T_n$ от 0 до π , а также части этих характеристик в более крупном масштабе. Характеристики не охватывают точку с координатами $(-1, j0)$, что для рассмотренных уровней средней мощности соответствует устойчивому состоянию реактора в режиме саморегулирования (т. е. без АР).

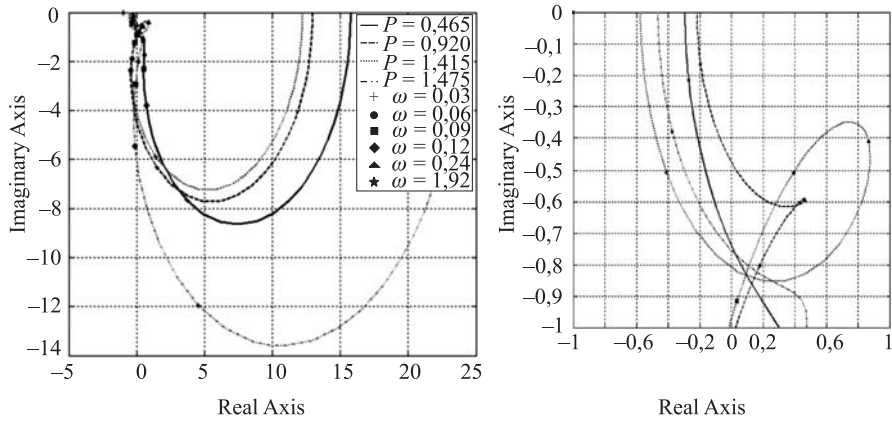


Рис. 7. Амплитудно-фазовая частотная характеристика МОС $W_{\theta}(j\omega)$

Блок запаздывающих нейтронов формирует положительную обратную связь. Блок МОС формирует в целом отрицательную обратную связь (хотя одна из его составляющих является положительной). На рис. 7 показана амплитудно-фазовая частотная характеристика линеаризованной мощностной обратной связи $W_{\theta}(j\omega)$. Входной величиной является отклонение энергии за период ΔE , а выходной — реактивность ρ_{θ} .

5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 8 показан (в зависимости от средней мощности реактора) суммарный коэффициент обратных связей $\sum k_{\theta j}$, а также относительное среднеква-

дратическое отклонение энергии импульсов $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Delta e_{in}^2}$, характери-

зующее уровень реакторных шумов. Для удобства анализа на рис. 8 выделены значения суммарного коэффициента МОС, характерные для каждого периода измерений (цикл измерений 2002 г., измерения 1984–1987 гг. и 1993–1996 гг.). В период работы реактора на номинальной мощности 2 МВт было обнаружено, что работа реактора в области меньших мощностей (на $\sim 25\%$ ниже номинальной) характеризуется повышенным уровнем реакторных шумов. Аналогичная область повышенных шумов была выявлена и в период работы реактора на мощности 1,5 МВт (рис. 8, а). С учетом этого в пиковой области реакторных шумов частотные характеристики мощностной обратной

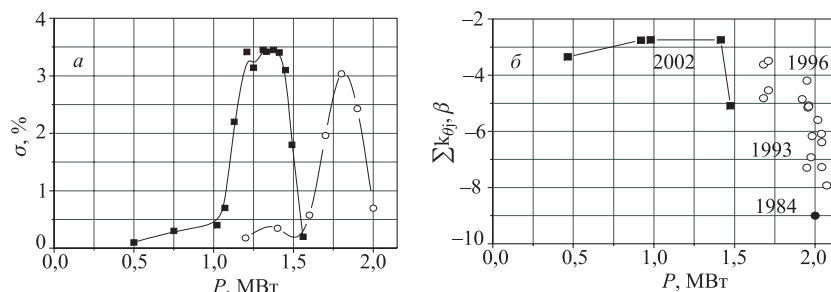


Рис. 8. Среднеквадратические отклонения зарегистрированных низкочастотных шумов энергии импульсов мощности σ (а) как показатель нестабильности реактора (\circ — для мощности 2 МВт; \blacksquare — для мощности 1,5 МВт) и суммарный коэффициент передачи мощностной обратной связи $\sum k_{\theta j}$ (б): \bullet — измерение 1984 г.; \circ — измерения 1993–1996 гг.; \blacksquare — измерения 2002 г.

связи не исследовались, поскольку принудительная модуляция реактивности, вводимая с целью определения параметров МОС, создавала бы дополнительный повышенный для нормальной работы реактора шум.

При анализе характеристик, соответствующих различным уровням средней мощности, просматривается определенная тенденция. Из частотных характеристик, соответствующих циклу измерений 2002 г., видно, что запас устойчивости по амплитуде (усилению) с ростом мощности от 0,465 до 0,920 МВт несколько уменьшается, на что указывает смещение амплитудно-фазовой частотной характеристики влево в сторону критической точки с координатами $(-1, j0)$ (рис. 5). При мощности 1,415 МВт запас по амплитуде несколько увеличивается по сравнению с мощностью 0,920 МВт, а при мощности 1,475 МВт он увеличивается существенно. На это же указывает сначала уменьшение, а затем увеличение модуля суммарного коэффициента обратной связи (рис. 8, б).

Как видно из рис. 8, б, значения суммарного коэффициента МОС, соответствующие работе реактора на мощности выше 1,85 МВт (1993–1996 гг.), флуктуируют в достаточно больших пределах (от -8 до $-4 \beta_n/\text{МВт}$). В целом, с учетом измерений 1984 г., эти данные характеризуют скорее общую тенденцию ослабления мощностной обратной связи в процессе работы реактора, чем ее количественную зависимость от мощности. В любом случае следует считать, что мощностная обратная связь уменьшается при длительной работе реактора. В области штатной эксплуатации реактора, т.е. вблизи 1,5 МВт, реактор достаточно устойчив, а суммарный коэффициент быстрой обратной связи находится в пределах $-(3-5)\beta_n/\text{МВт}$, что достаточно для саморегулирования реактора. В переходных процессах изменения мощности, например,

при штатном снижении или подъеме мощности, мощностная обратная связь несколько уменьшается, однако ее запас остается достаточным для саморегулирования реактора.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шабалин Е. П.* Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976.
2. *Попов А. К.* Импульсный коэффициент передачи реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р3-95-463. Дубна, 1995.
3. *Бондаренко И. И., Стависский Ю. Я.* Импульсный режим работы быстрого реактора // Атомная энергия. 1959. Т. 7, вып. 5. С. 417–420.
4. *Попов А. К.* Упрощенная нелинейная модель мощностной обратной связи реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-95-464. Дубна, 1995.
5. *Роров А. К., Рерулышев Ю. Н., Бондарченко Е. А.* The Model of the IBR-2 Pulsed Reactor of Periodic Operation for Investigations of Transitional Processes // Ann. Nucl. Ener. 2000. V. 27. P. 563–574.
6. *Бондарченко Е. А., Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Экспериментальное и модельное исследование особенностей динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2 // ЭЧАЯ. 2004. Т. 35, вып. 4. С. 928–983.

Получено 12 июля 2006 г.

Редактор *Е. В. Сабаева*

Подписано в печать 09.10.2006.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,87. Тираж 305 экз. Заказ № 55501.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/