

P13-2013-9

Ю. Н. Пепельшев, А. К. Попов

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ
МОЩНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА **ИБР-2М**
ПО ПЕРЕХОДНЫМ ПРОЦЕССАМ**

Направлено в журнал «Annals of Nuclear Energy»

Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.

P13-2013-9

Оценка параметров мощностной обратной связи
импульсного реактора ИБР-2М по переходным процессам

Путем математической обработки двух зарегистрированных переходных процессов по модели динамики реактора ИБР-2М оценены параметры мощностной обратной связи (МОС) реактора. Вычислены частотные и импульсные переходные характеристики, соответствующие этим параметрам. Полученные таким образом параметры МОС можно рассматривать как их экспрессную предварительную оценку, поскольку реальные измерения в этом случае занимают не более 30 мин. Суммарная МОС отрицательна при 1 и 2 МВт. Для реактора ИБР-2М в режиме саморегулирования запасы устойчивости, соответствующие полученным оценкам параметров МОС, можно считать удовлетворительными.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Pepelyshev Yu. N., Popov A. K.

P13-2013-9

Estimation of Power Feedback Parameters
of Pulse Reactor IBR-2M on Transients

Parameters of the IBR-2M reactor power feedback (PFB) on a model of the reactor dynamics by mathematical treatment of two registered transients are estimated. Frequency characteristics and the pulse transient characteristics corresponding to these PFB parameters are calculated. PFB parameters received thus can be considered as their express tentative estimation as real measurements in this case occupy no more than 30 minutes. Total PFB is negative at 1 and 2 MW. At the received estimations of PFB parameters in a self-regulation mode it is possible to consider the stability margins of the IBR-2M reactor satisfactory.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2013

ВВЕДЕНИЕ

При работе импульсного реактора ИБР-2М в режиме саморегулирования единственным стабилизирующим фактором является мощностная обратная связь (МОС). Поэтому при исследовании динамики реактора крайне важно представить МОС в виде обоснованной модели и оценить значения ее параметров. Для измерения параметров МОС исследуют переходной процесс изменения мощности как реакцию на быстрое изменение реактивности. Поскольку для ИБР-2М имеют место значительные шумы энергии импульсов, а возмущения мощности по условиям безопасности реактора должны быть небольшими, процедуру измерений МОС необходимо проводить многократно в течение длительного времени, вплоть до суток [1]. Такой алгоритм эксперимента кроме несомненных плюсов имеет и свои отрицательные стороны. Во-первых, в режиме саморегулирования мощность реактора в процессе длительных измерений может меняться. Кроме того, под воздействием неконтролируемых возмущений реактивности, которые всегда имеют место при нормальной работе реактора, переходные процессы изменения мощности искажаются. В итоге все это сказывается на точности оценок МОС и усложняет проведение эксперимента. Естественно, возникает вопрос, как упростить и сократить процедуру измерений при наличии шумов, значительно превышающих полезный сигнал? Это дало бы возможность получения экспрессных данных о динамическом состоянии реактора даже на границе колебательной неустойчивости, если таковая будет иметь место. В работе оценка параметров МОС проведена путем математической обработки с помощью модели динамики реактора двух зарегистрированных переходных процессов. Первый процесс — изменение положения промежуточного регулятора (отражатель нейтронов) при его перемещении с одного уровня на другой. Второй процесс — изменение энергии импульсов мощности с шумами, существенно превышающими сигнал, обусловленный перемещением промежуточного регулятора.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО РЕАКТОРА ИБР-2М. РЕАКТОРНЫЙ ШУМ

Модернизированный реактор ИБР-2 по сравнению с реактором ИБР-2 имеет существенные особенности. Во-первых, более компактная активная зона, рассчитанная на загрузку 69 тепловыделяющих сборок (ТВС) вместо 78 ТВС для реактора ИБР-2 и, как следствие, снижение массы загружаемого

топлива (PuO_2). Во-вторых, использование в качестве топливной загрузки только втулочных тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), в которых топливные таблетки имеют центральные осевые отверстия, что позволяет увеличить глубину выгорания до 9 %, т. е. почти в 1,5 раза в сравнении с ИБР-2. В-третьих, применение на ИБР-2М двух блоков аварийной защиты, каждый из которых реализует функции и быстрой, и медленной аварийной защиты. Это те основные изменения реактора, которые могут повлиять на его динамику. Схематический вид поперечного сечения ИБР-2М приведен на рис. 1.

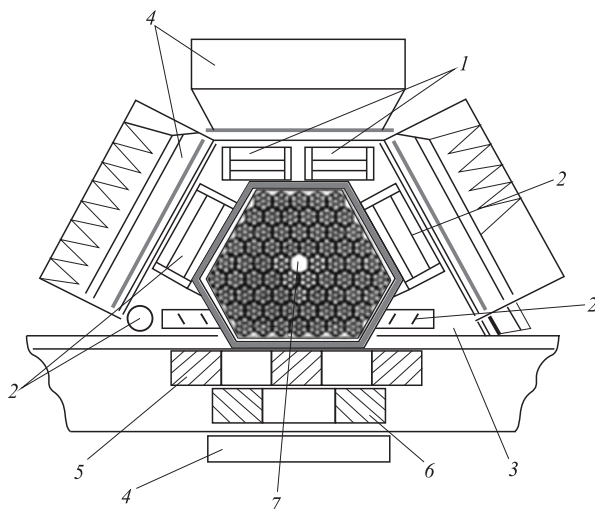


Рис. 1. Активная зона ИБР-2М: 1 — аварийные блоки; 2 — блоки регулирования мощности; 3 — стационарный отражатель; 4 — водяные замедлители; 5 — основной подвижный отражатель; 6 — дополнительный подвижный отражатель; 7 — нейтронный источник

Параметры шумов при работе реактора на мощности 2 МВт исследовались в работе [2]. Статистический анализ шумов проводился по $4,75 \cdot 10^6$ последовательным значениям энергии импульсов, что соответствовало 11 суткам непрерывной работы реактора. Плотность распределения энергии (мощности) импульсов приведена на рис. 2. Здесь понятия распределение энергии и распределение мощности импульсов эквивалентны, поскольку при постоянной и стабильной длительности вспышки соотношение между энергией вспышки и фона не меняется, и мощность есть просто энергия за период. Среднеквадратическое отклонение колебаний мощности за цикл составляет 110 кВт, а максимальные отклонения от среднего значения в большую сторону — 560 кВт и 430 кВт — в меньшую сторону. Относительный размах колебаний энергии импульсов ИБР-2М достигает 50 %. Очевидно, что любые допол-

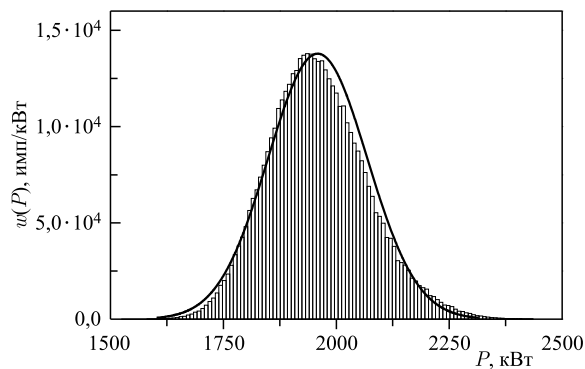


Рис. 2. Распределение импульсов на мощности 2 МВт и расходе натрия через активную зону $90 \text{ м}^3/\text{ч}$ по мощности, выделяемой за период следования импульсов. Линией показан результат аппроксимации по Гауссу

нительные возмущения мощности, вызванные, например, движением органов регулирования, будут теряться в шумах.

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ РЕАКТОРА ИБР-2М

Согласно общей теории управления реактор ИБР-2М, работающий на мощности, представлен в виде одноконтурной замкнутой системы с отрицательной обратной связью [3], обеспечиваемой инвертором, входящим в сумматор. Для удобства принято, что составляющая МОС с отрицательным коэффициентом передачи создает отрицательный эффект, а с положительным — положительный. Для обеспечения этого соответствия в канал обратной связи введен дополнительный инвертор (-1) (рис. 3). Прямой канал содержит блок, описывающий реактор нулевой мощности, обратный канал — мощностную обратную связь. В качестве переменных приняты отклонения переменных от их базовых значений, выраженные в относительных единицах. Базовые значения, т. е. значения переменных при стабильном уровне мощности, помечены верхним индексом 0. Значения переменных с индексом n соответствуют n -му импульсу мощности.

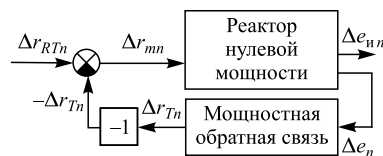


Рис. 3. Блок-схема импульсного реактора ненулевой мощности

Реактор нулевой мощности характеризуется одним входным и двумя выходными сигналами. В качестве входного сигнала принято Δr_{mn} — отклонение реактивности реактора от ее базового значения в долях β_n [3, 4]. Параметр β_n называется импульсной долей запаздывающих нейтронов. Для реак-

тора ИБР-2М этот параметр равен $\beta_{и} = 1,6 \cdot 10^{-4}$. В стационарном реакторе реактивность удобно выражать в долях запаздывающих нейтронов β (для плутониевого реактора $\beta = 2,16 \cdot 10^{-3}$), в импульсном реакторе — в долях $\beta_{и}$. Одним из выходных сигналов является $\Delta e_{иn}$ — отклонение (в относительных единицах) энергии импульса мощности $E_{иn}$ от ее базового значения $E_{и}^0$. Этот сигнал является регулируемым параметром. Другим выходным сигналом является Δe_n — относительное отклонение полной энергии E_n от ее базового значения E^0 . Под полной энергией n -го импульса $E_n = E_{иn} + E_{фn}$ понимается сумма энергии импульса $E_{иn}$, выделяемой в n -м импульсе мощности, и энергии фона $E_{фn}$, т. е. энергии, выделяемой в интервале между $(n - 1)$ -м и n -м импульсами мощности. В режиме стабилизации выходные сигналы $\Delta e_{иn}$ и Δe_n должны поддерживаться на нулевом уровне. В качестве выходного сигнала МОС принято Δr_{Tn} — отклонение реактивности МОС от ее базового значения в долях $\beta_{и}$. В качестве входного сигнала реактора ненулевой мощности принято Δr_{RTn} — отклонение реактивности (в долях $\beta_{и}$) от ее базового значения. Анализ работы реактора ИБР-2 показал, что для исследования динамики реактора достаточно представить МОС в виде суммы трех апериодических звеньев. Поскольку промежуточный регулятор перемещается из одного положения в другое за несколько секунд, т. е. достаточно медленно, из вызванного этим перемещением переходного процесса невозможно надежно оценить параметры МОС с постоянной времени, равной долям секунды. В связи с этим модель МОС представлена лишь двумя апериодическими звеньями (рис. 4). Как и для ИБР-2, коэффициент передачи самой медленной составляющей МОС принят зависимым от реактивности, обусловленной именно этой составляющей (рис. 4). Такая зависимость основана на двух предположениях: а) этот коэффициент передачи зависит от температуры топлива, б) температура топлива и реактивность указанной составляющей пропорциональны. Таким образом, учитывался нелинейный характер МОС. Расшифровка обозначений на блок-схемах, показанных на рис. 4 и 5, дана в следующем разделе, в котором приведены уравнения динамики реактора.

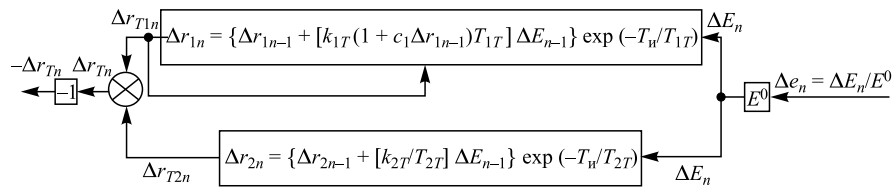


Рис. 4. Блок-схема мощностной обратной связи ИБР-2М

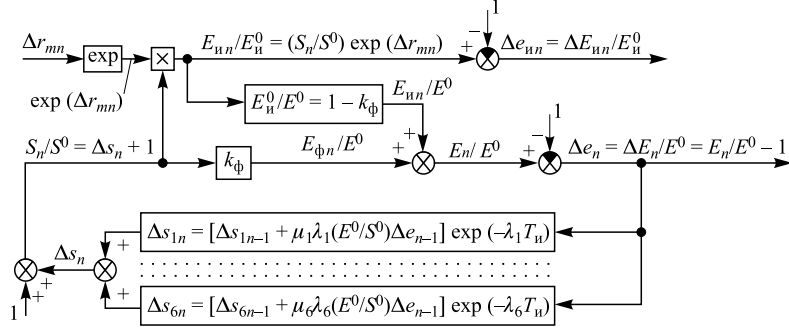


Рис. 5. Блок-схема импульсного реактора нулевой мощности

На рис. 5 показана блок-схема импульсного реактора нулевой мощности, соответствующая уравнениям кинетики в одноточечной модели реактора. Справедливость одноточечной модели ИБР-2 показана в работе [4].

УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА

Реактор ненулевой мощности в режиме саморегулирования может быть описан следующими уравнениями динамики, связывающими значения переменных в моменты появления импульсов мощности:

$$\begin{aligned} \Delta e_{in} &= \Delta E_{in}/E_u^0 = (E_{in} - E_u^0)/E_u^0, & \Delta e_n &= \Delta E_n/E^0 = (E_n - E^0)/E^0, \\ E^0 &= E_u^0 + E_\phi^0, \\ k_\phi &= \frac{E_\phi^0}{E^0} = \frac{\beta T_n}{\Delta k_{\text{ПО}} - \varepsilon_m^0} \frac{S^0}{E^0} = \frac{\beta T_n}{\Delta k_{\text{ПО}} - \varepsilon_m^0} \sum_i \mu_i \lambda_i \frac{1}{e^{\lambda_i T_n} - 1}, \\ \frac{E_u^0}{E^0} &= 1 - k_\phi, \\ \Delta s_n &= \Delta S_n/S^0 = (S_n - S^0)/S^0 = S_n/S^0 - 1, \\ \Delta s_{in} &= \Delta S_{in}/S^0 = (S_{in} - S_i^0)/S^0 = S_{in}/S^0 - S_i^0/S^0, \\ \Delta s_n &= \sum_{i=1}^6 \Delta s_{in} = \sum_{i=1}^6 \left(\Delta s_{in-1} + \mu_i \lambda_i \frac{E^0}{S^0} \Delta e_{n-1} \right) e^{-\lambda_i T_n}, \\ \frac{E^0}{S^0} &= 1 / \sum_i \mu_i \lambda_i \frac{1}{e^{\lambda_i T_n} - 1}, \\ \Delta e_n &= (\Delta e_{in} + 1)(1 - k_\phi) + (\Delta s_n + 1)k_\phi - 1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta r_{mn} &= (\varepsilon_{mn}/\beta_u) - (\varepsilon_m^0/\beta_u), \quad \Delta r_{mn} = \Delta r_{RTn} - (-\Delta r_{Tn}), \\
\Delta r_{Tn} &= \sum_{j=1}^2 \Delta r_{Tjn} = \left(\Delta r_{T1n-1} + E^0 \Delta e_{n-1} \frac{\tilde{k}_{T1}}{T_{T1}} \right) e^{-T_n/T_{T1}} + \\
&\quad + \left(\Delta r_{T2n-1} + E^0 \Delta e_{n-1} \frac{k_{T2}}{T_{T2}} \right) e^{-T_n/T_{T2}}, \\
\tilde{k}_{T1} &= k_{T1}(1 + c_1 \Delta r_{T1n-1}), \quad \Delta e_{un} = (\Delta s_n + 1) e^{\Delta r_{mn}} - 1.
\end{aligned}$$

В этих уравнениях использованы следующие обозначения: $E_n = E_{un} + E_{fn}$ — энергия, выделяемая в n -м импульсе мощности и в интервале между $(n-1)$ -м и n -м импульсами (полная энергия n -го периода); E_{un} — энергия n -го импульса; E_{fn} — энергия фона, выделяемая в интервале между $(n-1)$ -м и n -м импульсами; T_n — период импульсов; E_n^0 и $E^0 = P^0 T_n$ — базовые значения энергии импульса мощности и полной энергии за период импульсов (P^0 — средняя мощность реактора); Δe_{un} , Δe_n — относительные отклонения энергии импульса мощности и полной энергии за период; k_{fn} — доля энергии фона от полной энергии в базовом режиме; $\mu_i = \beta_i/\beta$ — относительная доля i -й группы запаздывающих нейтронов (β_i, β — доля запаздывающих нейтронов группы i и суммарная); β_u — импульсная доля запаздывающих нейтронов; $S_i = k_N \tau \lambda_i C_i / \beta$, $S = \sum_i S_i$ — нормированная интенсивность соответственно источников запаздывающих нейтронов группы i и суммарная, $\Delta s_{in} = (S_n - S^0)/S^0$, $\Delta s_n = \sum_i \Delta s_{in}$ — то же в относительных единицах (k_N, τ, C_i — соответственно коэффициент пропорциональности между плотностью нейтронов и мощностью, время жизни мгновенных нейтронов и концентрация источников запаздывающих нейтронов группы i); ε_m — максимум реактивности на мгновенных нейтронах в импульсе (в абсолютных единицах); $\Delta k_{\text{ПО}}$ — эффективность подвижного отражателя (в абсолютных единицах); $\Delta r_{mn}, \Delta r_{RTn}, \Delta r_{Tn}, \Delta r_{Tjn}$ — отклонения реактивностей от их базовых значений в долях β_u реактора нулевой и ненулевой мощности, МОС и j -й составляющей МОС; T_{Tj}, k_{Tj} — постоянная времени j -й составляющей МОС и ее коэффициент передачи (постоянная величина); \tilde{k}_{T1}, c_1 — нелинейный коэффициент передачи и параметр нелинейности первой (самой медленной) составляющей МОС.

На вычисляемые параметры МОС наложено условие $k_{T1}/T_{T1} = -k_{T2}/T_{T2}$. Это условие означает, что импульсная переходная характеристика МОС (т.е. изменение реактивности МОС, обусловленное одним импульсом мощности с энергией 1 МДж) не изменяется скачком. Иначе говоря, в момент появления импульса мощности реактивность МОС начинает изменяться с нулевого уровня плавно, а не скачком.

УСЛОВИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ. КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Переходные процессы регистрировались, когда реактор ИБР-2М работал в режиме саморегулирования при средней мощности 1 и 2 МВт и расходе теплоносителя $78 \text{ м}^3/\text{ч}$. На каждом уровне мощности были зарегистрированы два переходных процесса энергии импульсов мощности. Каждый процесс был инициирован перемещением промежуточного регулятора (ПР) сначала вниз (уменьшение реактивности), затем после выхода в среднем на стабильный уровень мощности — вверх (увеличение реактивности). На рис. 6 для примера показано изменение реактивности в двух переходных процессах с быстрым перемещением ПР вниз-вверх с переходом его с одного уровня на другой (начальная средняя мощность реактора 1 МВт). Процесс измерений заключался в следующем. Реактор стабилизировали на определенном уровне мощности, затем отключали систему автоматического регулирования мощности, т. е. во время измерений реактор работал в режиме саморегулирования, и с помощью ПР быстро изменяли уровень реактивности. Скачки реактивности задавались со скоростью $0,44 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}}/\text{с}$ (1 мм/с ПР) на величину до $\pm 3,1 \times 10^{-2} \beta_{\text{эф}}$ (± 7 мм ПР). Регистрировались последовательность значений энергии импульсов мощности с частотой 5 1/с и положение промежуточного регулятора с частотой 10 1/с. Далее по градуировочной шкале ПР (перемещение-реактивность) определялась вводимая реактивность, которая являлась входной переменной в модели динамики. Выходная переменная модели — зарегистрированная последовательность энергии импульсов. Обработка данных заключалась в подборе шести параметров мощностной обратной связи (коэффициентов передачи, постоянной времени, параметров нелинейности), при

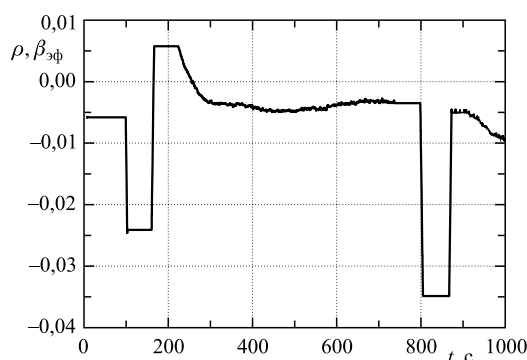


Рис. 6. Скачки реактивности (ρ) от времени на мощности 1 МВт и расходе натрия через активную зону $78 \text{ м}^3/\text{ч}$. Прямые линии — изменение реактивности посредством ПР в режиме саморегулирования (т. е. без автоматического регулятора (АР)), кривые — изменение реактивности посредством АР в режиме с автоматическим регулятором

которых среднеквадратическое отклонение зарегистрированного процесса изменений энергии импульсов от вычисленного было минимально. Минимизация проводилась методом перебора с частичным использованием метода Гаусса–Зайделя. С учетом неопределенности, вносимой шумами мощности, статистическая погрешность получаемых оценок МОС составляла $\pm 10\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На рис. 7 приведено типичное изменение энергии импульсов в двух циклах измерений параметров МОС на мощности 2 МВт при скачках реактивности вниз и вверх. Средние значения параметров мощностной обратной связи приведены в таблице.

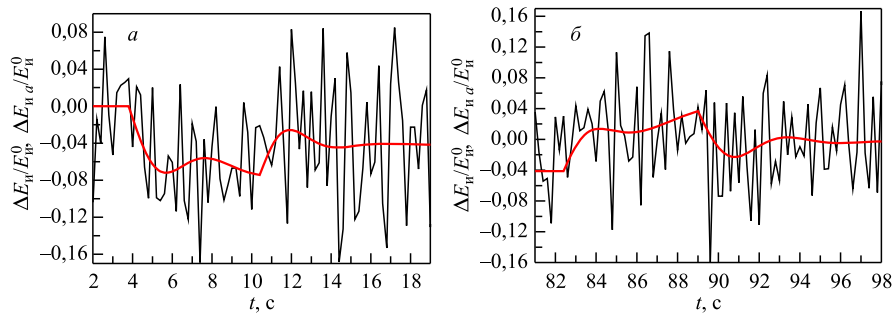


Рис. 7. Переходные процессы $\Delta E_n/\Delta E_n^0$, вызванные перемещением ПР на мощности 2 МВт и при расходе $78 \text{ м}^3/\text{ч}$: *a* — смещение ПР вниз на 7,1 мм (уменьшение реактивности), *б* — смещение ПР вверх на 6,7 мм (увеличение реактивности). Сплошная линия $\Delta E_n/\Delta E_n^0$ — результат обработки по модели

Средние значения параметров быстрой мощностной обратной связи

Название параметра	Средняя мощность, МВт	Значение параметра	
		1-е звено обратной связи	2-е звено обратной связи
Коэффициент передачи, $\beta_n/\text{МВт}$	1	$k_{T1} = -12,2$	$k_{T2} = 0,92$
	2	$k_{T1} = -5,2$	$k_{T2} = 1,11$
Постоянная времени, с	1	$T_1 = 5,3$	$T_2 = 0,4$
	2	$T_1 = 4,7$	$T_2 = 1,0$
Параметр нелинейности, $1/\beta_n$	1	$c_1 = -0,1$	—
	2	$c_1 = 0,4$	—

ИМПУЛЬСНАЯ ПЕРЕХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МОС

На рис. 8 приведены импульсные переходные характеристики принятой модели мощностной обратной связи ИБР-2М. Импульсная переходная характеристика МОС — это изменение реактивности МОС, обусловленное одним импульсом мощности с энергией 1 МДж. Импульсные характеристики вычислены для значений параметров МОС, соответствующих средней мощности реактора 1 и 2 МВт. В импульсном реакторе реактивность МОС, обусловленная любым импульсом мощности, не влияет на энергию этого импульса, а влияет лишь на последующие импульсы. Чтобы подчеркнуть это, импульсная переходная характеристика показана начиная с момента времени, равного периоду следования импульсов, т. е. спустя 0,2 с после вызвавшего ее импульса мощности.

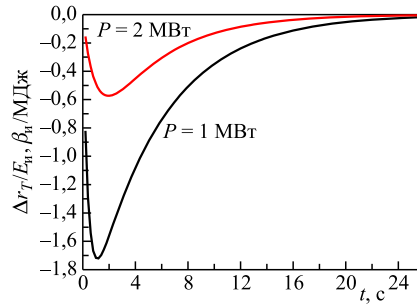


Рис. 8. Импульсные переходные характеристики МОС ИБР-2М, соответствующие средней мощности реактора 1 и 2 МВт

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ РЕАКТОРА В РЕЖИМЕ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ

На рис. 9 показаны амплитудно-фазовые частотные характеристики разомкнутой части системы при представлении реактора в режиме саморегулирования в виде одноконтурной замкнутой системы с отрицательной обратной связью на мощности 1 и 2 МВт. Модель реактора линеаризована. Параметр нелинейности МОС принят равным нулю ($c_1 = 0$).

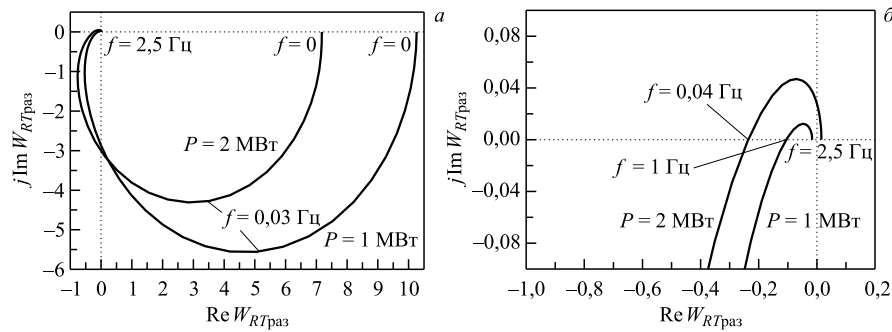


Рис. 9. Амплитудно-фазовые частотные характеристики разомкнутой системы (а) и их фрагменты (б) при средней мощности 1 и 2 МВт с расходом натрия через активную зону 78 м³/ч

Из амплитудно-фазовых частотных характеристик разомкнутой системы следует, что в режиме саморегулирования запас устойчивости по амплитуде равен 10 при мощности реактора 1 МВт и 4 при мощности 2 МВт. Это означает, что если бы общий коэффициент передачи МОС увеличился в 10 раз при мощности реактора 1 МВт и в 4 раза при мощности 2 МВт, то реактор вышел бы на границу устойчивости и в нем наблюдались бы незатухающие колебания с частотой 1 и 0,4 Гц соответственно. Запас устойчивости по фазе равен примерно 60° при средней мощности 1 МВт и 45° при средней мощности 2 МВт. Это означает, что реактор вышел бы на границу устойчивости, если в цепи МОС дополнительно появился бы элемент, осуществляющий задержку сигнала (чистое запаздывание) на 0,7 и 0,8 с соответственно. В проведенных экспериментах не было возможности оценить быструю составляющую МОС с постоянной времени менее 1 с, которая, по опыту реактора ИБР-2, должна быть отрицательной, т.е. способствующей устойчивости. Учитывая это, в обоих случаях запасы устойчивости ИБР-2М можно считать удовлетворительными.

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

На рис. 10 показаны частотные характеристики МОС ИБР-2М. Эти характеристики отражают зависимость реактивности МОС в долях β_n от энергии импульса мощности в МДж. При нулевой частоте значение амплитудной частотной характеристики МОС равно $\sum_j (k_{Tj}/T_{Tj}) / (1 - \exp(-T_n/T_{Tj}))$ или примерно $\sum_j k_{Tj}/T_n$.

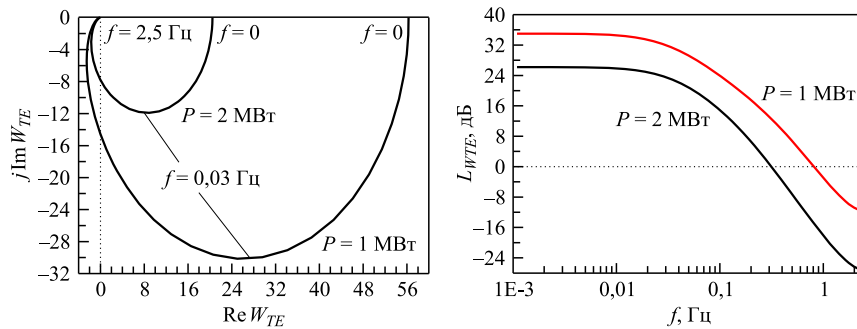


Рис. 10. Частотные характеристики модели МОС при средней мощности реактора 1 и 2 МВт. Слева — амплитудно-фазовые характеристики W_{TE} , справа — логарифмические амплитудные (f в Гц, $L_{W_{TE}} = 20 \lg |W_{TE}|$ в децибелах)

ВЫВОДЫ

В результате перемещения промежуточного регулятора энергия импульсов мощности изменяется не более чем на 8 %. Этот полезный сигнал существенно меньше шумов, вызванных неконтролируемыми случайными шумами реактивности 25 %. Тем не менее, математическая обработка этого процесса и одновременно зарегистрированного переходного процесса положения промежуточного регулятора позволила вычислить параметры модели мощностной обратной связи. При мощности 2 МВт постоянная времени отрицательной составляющей МОС равна 4,7 с, положительной — 1 с. Суммарная МОС отрицательна при 1 и 2 МВт. Для реактора ИБР-2М в режиме саморегулирования запасы устойчивости, соответствующие полученным оценкам параметров МОС, можно считать удовлетворительными. Вычисленные таким образом параметры МОС можно рассматривать как их экспрессную предварительную оценку, поскольку реальные измерения в этом случае занимают не более 30 мин. Более приемлемые по точности результаты можно получить при обработке существенно большего количества переходных процессов, соответствующих одной и той же средней мощности. Еще более надежную оценку параметров МОС (особенно ее быстрой составляющей с постоянной времени менее 1 с) может дать обработка переходных процессов, вызванных очень резким изменением реактивности, когда переход с одного уровня на другой осуществляется за время между импульсами, т. е. за время менее 0,2 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д., Цогтсайхан Ц. Статистический анализ флуктуаций энергии импульсов реактора ИБР-2М. Сообщение ОИЯИ Р13-2012-131. Дубна, 2012.
3. Попов А. К. Основы управления ядерным реактором: Учебное пособие. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2012. 208 с.
4. Бондаренко И. И., Ставиский Ю. Я. Импульсный режим работы быстрого реактора // АЭ. 1959. Т. 7, вып. 5. С. 417–420.

Получено 30 января 2013 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 27.02.2013.

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

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 1,05. Тираж 245 экз. Заказ № 57925.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/