

P13-2016-67

Ю. Н. Пепельшев¹, А. К. Попов¹, Д. Сумхуу^{1,2,*}

**СРАВНЕНИЕ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА **ИБР-2**
И ЕГО МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ ВЕРСИИ **ИБР-2М****

Направлено в журнал «Annals of Nuclear Energy»

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Институт физики и технологии МАН, Улан-Батор

* E-mail: dsumkhuu@jinr.ru

Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д.

P13-2016-67

Сравнение мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2 и его модернизированной версии ИБР-2М

В результате анализа переходных процессов мощности, обусловленных преднамеренными прямоугольными колебаниями реактивности при работе реакторов ИБР-2 и ИБР-2М при энерговыработке 800–900 МВт · сут, обоснована структура быстрой мощностной обратной связи. Вследствие различий в геометрии активных зон и структуре топлива симметричные колебания реактивности в реакторе ИБР-2 вызывали несимметричные колебания мощности, а в ИБР-2М — симметричные. Из анализа измеренной импульсной характеристики обратной связи реакторов при номинальной мощности 2 МВт следует, что реактор ИБР-2М более устойчив по сравнению с ИБР-2. Можно ожидать, что продолжительность работы ИБР-2М в существующем номинальном режиме при мощности 2 МВт и расходе теплоносителя через активную зону 100 м³/ч до наступления колебательной неустойчивости будет дольше по сравнению с ИБР-2.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2016

Pepeylshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.

P13-2016-67

Power Feedback of the IBR-2 Pulsed Reactor and Its Modernized Version IBR-2M in Comparison

Based on the analysis of the power transient processes caused by the intentional square-wave reactivity in the IBR-2 and IBR-2M reactors with burnup of 800–900 MW · day, the fast power feedback structure is substantiated. Due to the differences in the geometry of the reactor cores and fuel structure, symmetrical oscillations of reactivity induced asymmetrical power fluctuations in the IBR-2 reactor and symmetrical ones in the IBR-2M. The analysis of the measured pulse response of the reactor feedback at a nominal power of 2 MW shows that the IBR-2M is more stable in comparison with the IBR-2. It can be expected that the operation time of the IBR-2M in the existing nominal mode with a power of 2 MW and a flow of coolant through the core of 100 m³/h before the oscillatory instability is longer than at the IBR-2.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Импульсный реактор периодического действия ИБР-2М является модернизированной версией реактора ИБР-2, введенного в эксплуатацию в 1984 г. и остановленного в 2006 г. в связи с выработкой ресурса. На работу реактора сильное влияние оказывает разогрев активной зоны (АЗ). При анализе динамики влияние разогрева учитывается посредством мощностной обратной связи (МОС), которая влияет на пределы колебательной устойчивости реактора и работу системы автоматического регулирования мощности.

Из-за отличий активных зон ИБР-2 и ИБР-2М по геометрии и структуре топлива термомеханические процессы в активных зонах реакторов, вызываемые изменениями мощности, различаются. В связи с этим различаются структура и значения параметров МОС и, как следствие, динамика реакторов. Опыт эксплуатации ИБР-2 показал, что мощностная обратная связь и динамика реактора существенно зависят от энерговыработки, т. е. выгорания топлива, поэтому в работе сравниваются состояния реакторов, соответствующие начальному периоду эксплуатации, когда влиянием выгорания на динамику можно пренебречь. Это так называемые базовые исходные состояния. Для этих состояний в работе рассматриваются отличия в динамике ИБР-2 и ИБР-2М и ее влияние на колебательную устойчивость ИБР-2М и его безопасность.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В импульсном реакторе ИБР-2М вращающийся вблизи активной зоны модулятор реактивности создает импульсы реактивности. В результате реактор с периодом 0,2 с на короткое время (примерно 450 мкс) становится надкритическим на мгновенных нейтронах, оставаясь глубоко подкритическим основную часть периода. Вследствие этого реактор генерирует импульсы мощности с длительностью 200 мкс на половине высоты с периодом 0,2 с. Для ИБР-2 значения этих параметров были 240 мкс и 0,208 с соответственно.

Действие МОС, от которой зависит динамическая устойчивость реактора, проявляется в течение примерно 50 с после изменения мощности и опреде-

ляется в основном процессами, происходящими в активной зоне [1]. Более медленные составляющие МОС [2, 10] не учитываются, поскольку они не оказывают какого-либо заметного влияния на динамику реактора.

Увеличение мощности реактора приводит к росту температуры составляющих его частей, к расширению топлива, теплоносителя, опорной плиты, на которой крепятся топливные кассеты, к изгибу топливных кассет, корпуса реактора и модулятора реактивности и т.д. При уменьшении мощности происходят обратные изменения.

Активные зоны ИБР-2 и ИБР-2М имеют отличия. Во-первых, активная зона ИБР-2М компактнее. Она рассчитана на загрузку 69 тепловыделяющих сборок (ТВС) вместо 78 для ИБР-2, т.е. масса загружаемого топлива (PuO_2) меньше. Во-вторых, в ИБР-2М тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ) состоят из таблеток с отверстиями в центре, что позволяет увеличить глубину выгорания до 9%, т.е. почти в 1,5 раза по сравнению с ИБР-2. В-третьих, в активной зоне ИБР-2М нет центрального канала, который был в активной зоне ИБР-2 и предусматривался для размещения в нем нейтронно-производящей мишени с тем, чтобы реактор мог работать не только в реакторном, но и в бустерном режиме (совместно с ускорителем). Схематичный вид поперечного сечения ИБР-2 и ИБР-2М приведен на рис. 1.

Эффект мощностной обратной связи определяется как изменение реактивности, обусловленное изменением мощности реактора при неизменных значениях входной температуры и расхода теплоносителя (натрия). Для изучения мощностных эффектов использована методика исследования переходных процессов мощности при преднамеренных периодических прямоугольных колебаниях реактивности [2]. В процессе экспериментов на реакторах ИБР-2 и ИБР-2М регистрировались последовательности значений энергии импульсов мощности, вызванных этими колебаниями реактивности. В качестве задатчика колебаний реактивности использовался автоматиче-

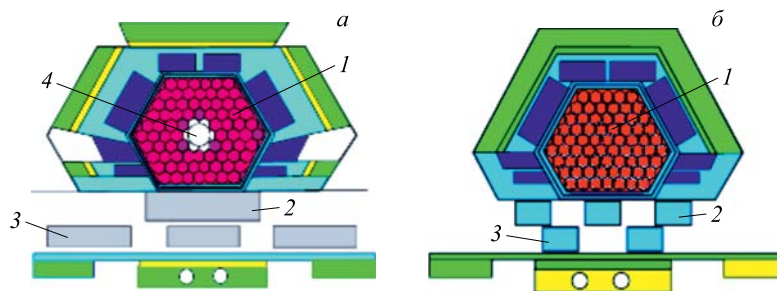


Рис. 1. Активная зона ИБР-2 (а) и ИБР-2М (б): 1 — активная зона; 2 — основной подвижный отражатель; 3 — дополнительный подвижный отражатель; 4 — канал мишени ускорителя

ский регулятор (АР), выведенный из контура регулирования. Ввод и вывод реактивности осуществлялся в интервалах между соседними импульсами мощности. Амплитуда задающей реактивности изменялась в диапазоне $r_0 = \pm(0,056-0,065)\beta_{\text{и}}$, где $\beta_{\text{и}}$ — так называемая импульсная доля запаздывающих нейтронов [3], которой удобно пользоваться в качестве единицы измерения реактивности при анализе динамики импульсного реактора. Для ИБР-2М $\beta_{\text{и}} = 1,54 \cdot 10^{-4}$, для ИБР-2 $\beta_{\text{и}} = 1,6 \cdot 10^{-4}$.

По зарегистрированным переходным процессам энергии импульсов, обусловленных прямоугольными колебаниями реактивности, вычислялись импульсные характеристики МОС. Импульсная характеристика МОС представляет собой изменение реактивности МОС во времени под действием бесконечно узкого импульса единичной площади 1 МДж, т. е. дельта-функции. Импульсная характеристика МОС ИБР-2 хорошо описывается тремя экспоненциальными составляющими с постоянными времени от 0,2 до 12 с [6–9]:

$$r_n = \sum_{j=1}^3 r_{jn} = \sum_{j=1}^3 \frac{k_j}{T_j} \exp\left(\frac{-T_{\text{и}}}{T_j}\right), \quad (1)$$

где r_n и r_{jn} — суммарная реактивность МОС и ее j -е составляющие, соответствующие n -му импульсу мощности; k_j, T_j — коэффициент передачи и постоянная времени j -й составляющей МОС соответственно ($j = 1, 2, 3$); $T_{\text{и}}$ — период импульсов мощности.

Реактивность каждой составляющей можно рассматривать как выходной сигнал аperiodического звена при входном сигнале в виде последовательности импульсов мощности. В связи с тем, что переходные процессы мощности ИБР-2 при симметричных колебаниях реактивности несимметричны, коэффициенты передачи МОС ИБР-2 были приняты нелинейными. Для $j = 1$

$$r_{jn} = \left(r_{jn-1} + \frac{k_j(1 + c_j r_{jn-1})}{T_j} \Delta e_{\text{и}n-1} P^0 T_{\text{и}} \right) \exp\left(\frac{-T_{\text{и}}}{T_j}\right), \quad (2)$$

т. е. зависит от реактивности этой составляющей r_1 , а для $j = 2, 3$

$$r_{jn} = \left(r_{jn-1} + \frac{k_j(1 + c_j r_{n-1})}{T_j} \Delta e_{\text{и}n-1} P^0 T_{\text{и}} \right) \exp\left(\frac{-T_{\text{и}}}{T_j}\right), \quad (3)$$

т. е. зависит от суммарной реактивности МОС r .

В уравнениях (2) и (3) c_j — параметр нелинейности МОС; $\Delta e_{\text{и}}$ — относительная энергия импульсов мощности; P^0 — средняя мощность реактора. Сумма трех коэффициентов передачи МОС $\left(k = \sum_j^3 k_j \right)$ дает быстрый асимптотический коэффициент реактивности.

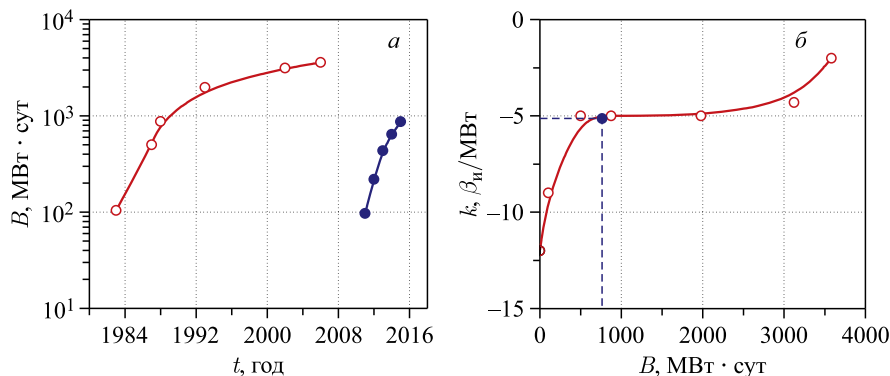


Рис. 2. Энерговывработка импульсных реакторов ИБР-2 (○) и ИБР-2М (●) в зависимости от времени работы реактора (а) и коэффициент передачи МОС ИБР-2 k в зависимости от энерговывработки (б). Точкой на кривой МОС (б) отмечен момент измерения для ИБР-2 и ИБР-2М при энерговывработке ~ 850 МВт · сут

Как уже было сказано, параметры МОС сильно зависят от энерговывработки. На рис. 2 показаны изменения энерговывработки в зависимости от времени работы ИБР-2 и ИБР-2М (а) и суммарного коэффициента передачи МОС ИБР-2 в зависимости от энерговывработки (б) [11]. Из рис. 2 видно, что суммарный коэффициент передачи МОС k в некоторые моменты эксплуатации ИБР-2 довольно сильно меняется в сторону ослабления обратной связи. Это означает, что каждому реакторному циклу соответствует свой уменьшающийся по модулю коэффициент передачи МОС [4, 11], и это приводит к тому, что динамика реактора в процессе его эксплуатации меняется, а запас устойчивости уменьшается. Такой же характер изменения динамики можно ожидать для ИБР-2М. Поэтому для сравнительной оценки динамики реакторов выбирались состояния с близкими и небольшими значениями энерговывработки: на уровне ~ 800 – 900 МВт · сут.

Нужно также отметить, что на динамику реакторов влияет расход теплоносителя через АЗ [11]. Для сравнения динамического состояния двух реакторов в табл. 1 приведены значения расхода натрия через АЗ, принятые для эксплуатационного (номинального) режима.

Таблица 1. Динамические параметры ИБР-2 и ИБР-2М при номинальной мощности 2 МВт, измеренные в 1988 и 2015 гг.

Параметр	ИБР-2, 1988	ИБР-2М, 2015
Энерговывработка, МВт · сут	~ 900	~ 850
Расход теплоносителя через АЗ, м ³ /ч	90	100

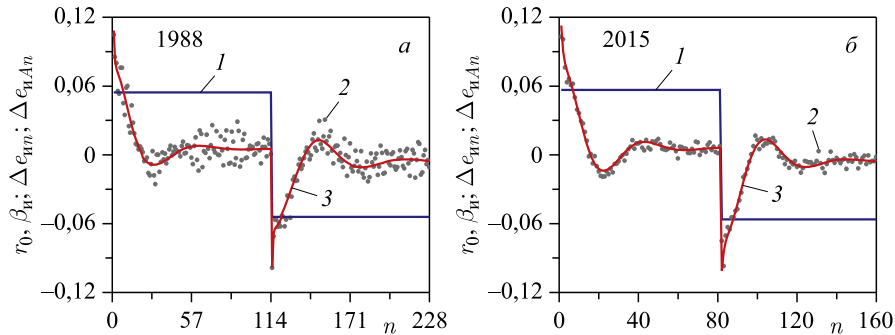


Рис. 3. Переходные процессы изменения энергии импульсов реакторов ИБР-2 (а) и ИБР-2М (б) при прямоугольных колебаниях задающей реактивности r_0 (1) при средней мощности 2,0 МВт: 2, 3 — зарегистрированное $\Delta\epsilon_{ин}$ и вычисленное $\Delta\epsilon_{инA_n}$ относительные отклонения энергии импульса мощности соответственно; n — номер импульса

С помощью указанной выше методики ввода осциллирующей реактивности были получены оценки параметров МОС ИБР-2 и ИБР-2М для разных уровней средней мощности, в том числе и номинальной 2 МВт [4–6, 12].

Обработка данных заключалась в следующем. Исходный зарегистрированный переходный процесс, обусловленный периодическими прямоугольными колебаниями реактивности, приводился к усредненному периоду колебаний относительного отклонения энергии импульсов ($\Delta\epsilon_{ин}$), в котором исходная шумовая составляющая существенно уменьшалась. Этот усредненный период колебаний с уменьшенным шумом принимался в качестве зарегистрированного переходного процесса $\Delta\epsilon_{ин}$ (рис. 3). Далее переходный процесс $\Delta\epsilon_{инA_n}$ вычислялся по уравнениям кинетики и МОС, представленным в виде разностных уравнений, связывающих значения переменных, соответствующих текущему и предшествующему импульсам мощности [7–9]. На рис. 3 для примера показаны переходные процессы изменения энергии импульсов за период модуляции реактивности ИБР-2 и ИБР-2М при номинальной мощности 2 МВт и значениях энергосвязи, близких к 850 МВт·сут.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ПАРАМЕТРАМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ИБР-2 И ИБР-2М

Значения параметров МОС реакторов ИБР-2 и ИБР-2М сведены в табл. 2. На рис. 4 показаны импульсные переходные характеристики МОС.

Из рис. 4 видно, что импульсные характеристики МОС ИБР-2 и ИБР-2М различаются, что свидетельствует о различии в параметрах динамики. Первое указание на различие динамики реакторов было получено при сравне-

Таблица 2. Параметры МОС ИБР-2М при штатном расходе натриевого теплоносителя через активную зону 100 м³/ч (2015 г.) и параметры МОС ИБР-2 при штатном расходе теплоносителя 90 м³/ч (1988 г.) при номинальной средней мощности 2 МВт и энерговыработке 850–900 МВт · сут

Параметр	ИБР-2М			ИБР-2		
	Номер компонентов МОС, j					
	1	2	3	1	2	3
Коэффициент передачи $k_j, \beta_n/\text{МВт}$	-5,91	1,59	-0,82	-6,98	2,16	-0,43
Постоянная времени $T_j, \text{с}$	7,60	1,02	0,46	9,00	3,00	0,24
Коэффициент нелинейности c_j, β_n^{-1}	0	0	0	-0,50	0,60	-2,20
Суммарный коэффициент передачи $k = \sum_j k_j, \beta_n/\text{МВт}$	-5,14			-5,25		

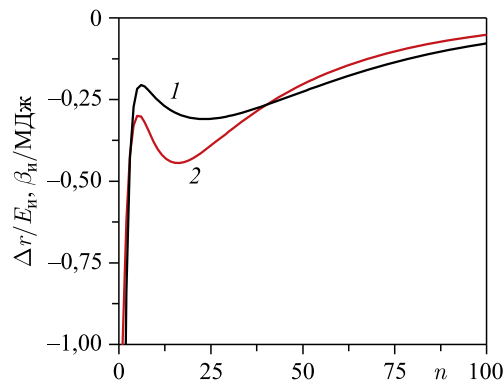


Рис. 4. Импульсные переходные характеристики МОС ИБР-2 (1) и ИБР-2М (2) при номинальной средней мощности реакторов 2 МВт и энерговыработке 850–900 МВт · сут; n — номер импульса

нии реакций реакторов на симметричные возмущения реактивности в большую и меньшую стороны относительно равновесного критического состояния. В ИБР-2М симметричные колебания реактивности вызывают симметричные колебания мощности. Напротив, в ИБР-2 симметричные колебания реактивности вызвали несимметричные колебания мощности. Таким образом, мощностная обратная связь в ИБР-2 — нелинейная, а в ИБР-2М может быть описана линейными уравнениями [12]. Ниже приведен анализ устойчивости реакторов с использованием измеренных импульсных характеристик. Использовался формализм передаточных функций импульсного реактора как импульсной системы.

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ И КРИТЕРИЙ УСТОЙЧИВОСТИ РЕАКТОРОВ

Основные динамические свойства импульсного реактора могут быть определены, если известны его амплитудно-фазовые частотные характеристики (АФЧХ), или диаграммы Найквиста. Эти характеристики отражают амплитудную и фазовую связь между синусоидальными сигналами на входе (реактивность) и выходе (энергия импульсов) реактора. АФЧХ есть график импульсной частотной передаточной функции реактора $W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$ на комплексной плоскости. Этой характеристике соответствует импульсная передаточная функция $W(z)$, где $z = \exp(j\omega)$. Частота колебаний меняется от 0 до $0,5f_n$, где $f_n = 1/T_n$ — частота импульсов мощности, а безразмерная частота $\omega = 2\pi fT_n$ — от 0 до π . Длина вектора, проведенного из начала координат в точку с частотой ω , равная $|W(j\omega)| = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}$, есть амплитудно-частотная характеристика (коэффициент усиления), а угол поворота вектора от действительной положительной полуоси $\varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}$ — фазочастотная характеристика реактора. Например, для АФЧХ импульсного реактора (эта характеристика будет подробнее обсуждаться ниже — см. рис. 5) длина вектора, проведенного из начала координат в любую точку кривой, соответствующей частоте ω , равна отношению амплитуды синусоидального колебания энергии импульса мощности в относительных единицах $\Delta e_n = (E_n - E_n^0)/E_n^0$ (выходная величина) к амплитуде синусоидального колебания реактивности (входная величина), выраженной в долях β_n . Здесь E_n, E_n^0 — энергия текущего импульса мощности и ее базовое значение соответственно. Угол поворота вектора относительно действительной положительной полуоси представляет собой фазовый сдвиг между колебаниями мощности и реактивности.

Оценка устойчивости реактора по критерию Найквиста заключается в следующем. Реактор представляется в виде замкнутой одноконтурной системы. Если разомкнутая система устойчива или нейтральна, то замкнутая система устойчива при условии, если АФЧХ разомкнутой системы не охватывает точку с координатами $(-1, j0)$. Запас устойчивости по амплитуде (усилению) показывает, во сколько раз надо увеличить коэффициент усиления, чтобы вывести систему из устойчивого состояния на границу устойчивости $(-1, j0)$. Запас по фазе определяют как угол, при повороте на который конец вектора единичной длины окажется в точке с координатами $(-1, j0)$ и АФЧХ разомкнутой системы пройдет через эту точку, т.е. когда замкнутая система выйдет на границу устойчивости. Запас по фазе отражает возможное влияние дополнительной неучтенной инерционности системы.

На рис. 5 показаны амплитудно-фазовые частотные характеристики разомкнутой системы при представлении реакторов ИБР-2 и ИБР-2М в режиме

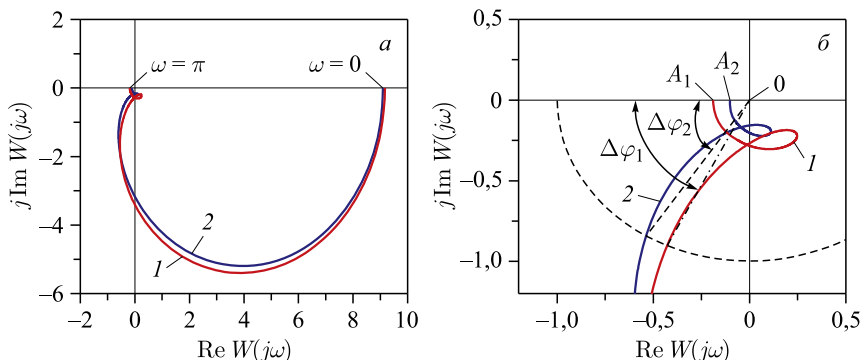


Рис. 5. Амплитудно-фазовые частотные характеристики разомкнутой системы при представлении реакторов ИБР-2 (1) и ИБР-2М (2) без автоматического регулятора в виде одноконтурной замкнутой системы при мощности 2 МВт (а, б). Более детально участок характеристики представлен вблизи нуля, $a = 1/0A$ и $\Delta\varphi$ — запас устойчивости по амплитуде и фазе соответственно (б)

саморегулирования в виде одноконтурной замкнутой системы с отрицательной связью при мощности 2,0 МВт. Значения коэффициентов передачи и постоянных времени МОС взяты из табл. 2. АФЧХ разомкнутой системы не охватывает точку на комплексной плоскости с координатами $(-1, j0)$ [7]. Следовательно, реакторы ИБР-2 и ИБР-2М в режиме саморегулирования устойчивы. Их запасы устойчивости при указанных параметрах МОС вполне достаточные (рис. 5, б) для безопасной работы.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В результате анализа переходных процессов мощности, обусловленных преднамеренными прямоугольными колебаниями реактивности при работе реакторов ИБР-2 и ИБР-2М в режиме саморегулирования, обоснована структура мощностной обратной связи. Как было сказано выше, конструктивно активная зона ИБР-2М отличается от активной зоны ИБР-2 тем, что сплошь заполнена тепловыделяющими элементами, в то время как в центре активной зоны ИБР-2 была пустая полость. Видимо, вследствие этого симметричные колебания реактивности вызывали в реакторе ИБР-2 несимметричные колебания мощности, а в ИБР-2М — симметричные. Это позволило описать мощностную обратную связь реактора ИБР-2М тремя линейными дифференциальными уравнениями первого порядка, а ИБР-2 — тремя нелинейными уравнениями.

Наиболее вероятная физическая интерпретация результатов обработки выглядит следующим образом. Самая медленная компонента обратной связи

связана с топливной составляющей (аксиальное расширение топлива), остальные компоненты — натриевые. Положительная обратная связь (см. табл. 2) как часть натриевых эффектов обусловлена, вероятнее всего, термомеханическими деформациями топливных элементов через градиент температуры натрия и для ИБР-2М проявляется в меньшей степени. В то же время из рис. 4 видно, что полная импульсная характеристика обратной связи для ИБР-2М находится гораздо дальше от положительных значений реактивности, чем для ИБР-2, т.е. по сравнению с ИБР-2 при номинальной мощности реактор ИБР-2М более устойчив. При этом суммарные коэффициенты МОС в пределах ошибки практически равны друг другу по модулю (см. табл. 2). Поэтому использование критерия устойчивости по суммарному коэффициенту передачи МОС не совсем корректно, поскольку не учитывает «тонкую» внутреннюю структуру обратной связи, в которой наряду с отрицательными компонентами присутствуют и положительные.

Более точные результаты по устойчивости получаются при использовании частотного критерия Найквиста. Из сравнения амплитудно-фазовых частотных характеристик разомкнутых систем, соответствующих ИБР-2 и ИБР-2М в режиме саморегулирования при мощности 2 МВт, получены следующие значения запасов устойчивости по амплитуде $a = 1/\overline{0A}$ и фазе $\Delta\varphi$ (см. рис. 5). Запас по амплитуде для ИБР-2М практически в два раза выше, чем для ИБР-2. Запас по фазе в частотной характеристике для обоих реакторов достаточно большой: 57,47 и 64,72 для ИБР-2М и ИБР-2 соответственно. Можно считать, что при равной энерговыработке запас устойчивости ИБР-2М в целом выше, чем у ИБР-2. Соответственно, продолжительность работы реактора ИБР-2М в существующем номинальном режиме до границы устойчивости при мощности 2 МВт и расходе теплоносителя через АЗ 100 м³/ч будет дольше по сравнению с ИБР-2. На устойчивость ИБР-2М дополнительно могло повлиять и повышение расхода теплоносителя через АЗ ИБР-2М (100 м³/ч) по сравнению с соответствующим периодом работы ИБР-2 (90 м³/ч). Влияние расхода на устойчивость работы ИБР-2М — тема дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Попов А. К.* Частотная и импульсная переходные характеристики мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2. Сообщ. ОИЯИ Р13-90-203. Дубна, 1990.
2. *Попов А. К.* Анализ устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при девятипараметрической модели мощностной обратной связи. Сообщ. ОИЯИ Р13-96-297. Дубна, 1996.
3. *Бондаренко И. И., Стависский Ю. Я.* Импульсный режим работы быстрого реактора // АЭ. 1959. Т. 7, вып. 5. С. 417–420.

4. *Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Оценка параметров мощностной обратной связи и устойчивости ИБР-2 при различных уровнях средней мощности // *АЭ.* 2007. Т. 103, вып. 2. С. 89–93.
5. *Попов А. К.* Импульсный коэффициент передачи реактора ИБР-2. Сообщ. ОИЯИ Р3-95-463. Дубна, 1995.
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.
7. *Попов А. К.* Основы управления ядерным реактором: Учеб. пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. 208 с.
8. *Пепельшев Ю. Н. и др.* Модель динамики импульсного реактора ИБР-2М для анализа быстрых переходных процессов // *Письма в ЭЧАЯ.* 2015. Т. 12, № 3(194). С. 682–686.
9. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhui D.* Model of Dynamics of the IBR-2M Pulsed Reactor for Study of Transient Processes in a Wide Range Change of Power // *Ann. Nucl. Energy.* 2015. V. 85. P. 488–493.
10. *Попов А. К.* Анализ длительного колебательного переходного процесса мощности импульсного реактора ИБР-2. Сообщ. ОИЯИ Р13-97-361. Дубна, 1997.
11. *Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю. Н.* Изменение быстрых эффектов реактивности в процессе работы реактора ИБР-2. Сообщ. ОИЯИ Р13-2008-1. Дубна, 2008.
12. *Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д.* Оценка параметров мощностной обратной связи реактора ИБР-2М с помощью прямоугольных колебаний реактивности. Препринт ОИЯИ Р13-2016-17. Дубна, 2016.

Получено 14 октября 2016 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 08.12.2016.

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

Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 0,96. Тираж 215 экз. Заказ № 58982.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/