

P13-2023-64

Ю. Н. Пепелышев<sup>1</sup>, Д. Сумхуу<sup>1,2</sup>

ВЛИЯНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО  
РЕАКТОРА **ИБР-2М** НА ЕГО ДИНАМИКУ

Направлено в журнал «Nuclear Engineering and Technology»

---

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>2</sup> Институт физики и технологии МАН, Улан-Батор

Пепельшев Ю. Н., Сумхуу Д.

P13-2023-64

Влияние автоматического регулятора мощности импульсного реактора ИБР-2М на его динамику

Расчетно-экспериментальным путем с использованием математической модели динамики ИБР-2М с учетом реальных параметров быстрой мощностной обратной связи получены новые оптимальные значения параметров системы автоматического регулирования (АР) мощности. Оптимальность в данном случае есть способность системы АР уменьшать реакторный шум в целом и его низкочастотную компоненту в частности. Рассмотрены два варианта работы статистически оптимального автоматического регулятора. При действующем варианте АР, при котором используется усреднение данных со старением информации, видно, что параметры переходного процесса мощности сильно зависят от значения коэффициента сглаживания  $q$ : с увеличением  $q$  качество переходного процесса ухудшается, а резонансные линии в низкочастотных колебаниях энергии импульсов растут. Для второго варианта статистически оптимального АР при постоянной информационной ценности регулируемого параметра  $N$  расчеты показывают, что оптимальное значение коэффициента  $N$  находится в достаточно узком диапазоне (4–8), не выше и не ниже.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2023

Pepelyshev Yu. N., Sumkhuu D.

P13-2023-64

Influence of an Automatic Power Control System of the IBR-2M Pulsed Reactor on Its Dynamics

New optimal values of the parameters of the automatic power control (AC) system were obtained by modeling and experimentally using the mathematical model of the IBR-2M dynamics, taking into account the real parameters of the fast power feedback. Optimality in this case is the ability of the AC system to reduce reactor noise in general and especially its low-frequency component. Two variants of operation of a statistically optimal automatic controller are considered. For the operating AC variant, which uses data averaging with information aging, it can be seen that the parameters of the power transition process strongly depend on the value of the smoothing coefficient  $q$ . With increasing  $q$ , the quality of the transient process deteriorates, and the resonant lines in the low-frequency oscillations of the pulse energy grow. For the second variant of the statistically optimal AC with a constant information value of the controlled parameter  $N$ , calculations show that the optimal value of the coefficient  $N$  is in a fairly narrow range (4–8), neither higher nor lower.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2023

## **ВВЕДЕНИЕ**

Импульсный реактор ИБР-2М, действующий в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований (Дубна), служит источником нейтронов для проведения экспериментов на выведенных нейтронных пучках. Для стабилизации и регулирования средней мощности реактор снабжен системой автоматического регулирования (АР). Отличительной особенностью функционирования ИБР-2М является повышенный по сравнению с реакторами стационарного (не импульсного) типа уровень нейтронных шумов. Под термином «нейтронный шум» понимается шум мощности, или шум энергии импульсов. Высокий уровень шумов (до 50 % разброса относительно среднего значения) во многом мешает нормальной и безопасной работе реактора. Поэтому исследованию и диагностике шумов ИБР-2М уделяется большое внимание. Система АР для решения этой задачи играет важную роль. В некоторых случаях работа системы АР является единственным способом корректировки уровня той или иной спектральной компоненты шума. Важное значение для безопасности ИБР-2М имеет динамика низкочастотной компоненты реакторного шума  $\sim 0,1$  Гц. Амплитуда этой компоненты достаточно быстро растет с энерговыработкой, но по условиям безопасности она должна быть ограничена. Проведенная ранее оптимизация параметров АР позволила уменьшить рост низкочастотных шумов [1]. Но наблюдаемое с энерговыработкой ослабление мощностной обратной связи и рост связанных с этим низкочастотных шумов потребовали дополнительной оптимизации АР. В работе расчетно-экспериментальным путем с использованием математической модели динамики ИБР-2М получены новые оптимальные значения параметров АР. Оптимальность в данном случае есть способность системы АР уменьшать реакторный шум в целом и его низкочастотную компоненту в частности.

### **1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ИБР-2М**

Импульсный реактор периодического действия ИБР-2М представляет собой модернизированную версию реактора ИБР-2, выведенного из эксплуатации в 2006 г. в связи с выработкой ресурса [2]. Основные параметры ИБР-2М приведены в табл. 1. В этом реакторе создаются периодические

Таблица 1. Основные параметры ИБР-2М

Параметр	Значение
Средняя мощность, МВт	2
Тип топлива	PuO <sub>2</sub>
Количество кассет	69
Теплоноситель	Na
Номинальный расход теплоносителя, м <sup>3</sup> /ч	100
Максимальное выгорание, %	9
Частота импульсов, Гц	5
Полуширина импульса по быстрым нейтронам, мкс	200
Плотность потока тепловых нейтронов с поверхности замедлителя, см <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup> :	
усредненная по времени	~ 10 <sup>13</sup>
максимум в импульсе	~ 10 <sup>16</sup>

узкие импульсы реактивности большой амплитуды с периодом 0,2 с, что достигается благодаря вращению вблизи активной зоны (а. з.) подвижного отражателя. Органы управления приводятся в такое положение, в котором в течение коротких интервалов времени (~ 450 мкс) реактор становится надкритическим на мгновенных нейтронах, оставаясь глубокоподкритическим в интервалах между импульсами. В результате с периодом 0,2 с реактор генерирует мощные нейтронные импульсы (импульсы мощности) шириной 200 мкс. Подавляющая часть энергии (92%), выделяемой за период, выделяется в импульсе мощности, между импульсами выделяется лишь 8% (энергия фона). В результате импульсный реактор может быть представлен как сугубо импульсная система, и его динамика описана дискретными уравнениями.

## 2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ИБР-2М И БЫСТРАЯ МОЩНОСТНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Для оценки динамического состояния ИБР-2М была создана математическая модель реактора [3–5]. Она позволяет моделировать переходные процессы мощности, а также проводить частотный анализ при разных режимах работы реактора. На рис. 1 показана блок-схема модели динамики ИБР-2М в режиме АР мощности. Модель состоит из трех основных частей: блока кинетики, блока мощностной обратной связи (МОС), обусловленного разогревом реактора, и блока АР мощности. В расчетах менялись значения параметров блока АР, и при разных наборах параметров МОС вычислялись переходные процессы энергии импульсов и амплитудно-частотные характеристики реактора. Блок кинетики не менялся.

Параметры блока быстрой МОС были определены экспериментально в период 2015–2021 гг. [6, 7]. Исследования проводились при разных уровнях средней мощности реактора при постоянном расходе теплоносителя

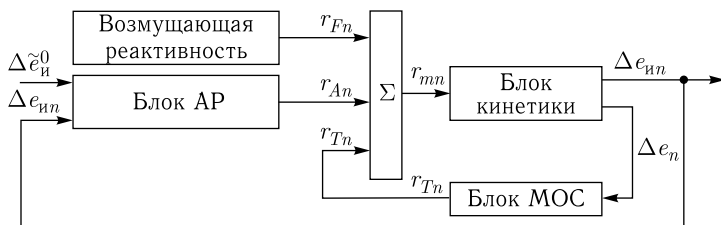


Рис. 1. Блок-схема модели динамики ИБР-2М в штатном режиме работы с системой АР мощности

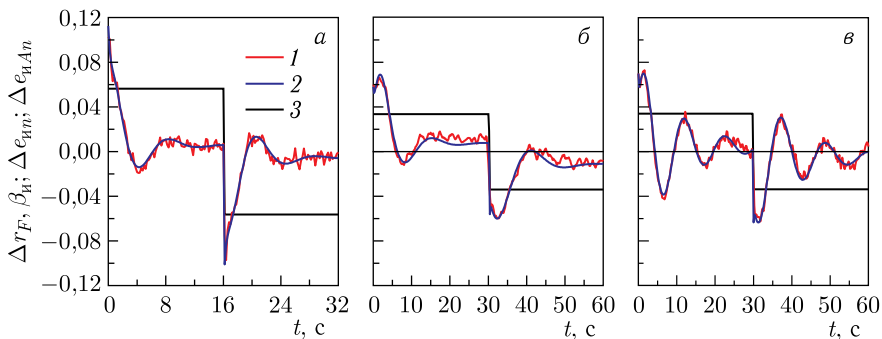


Рис. 2. Виды зарегистрированных переходных процессов относительных отклонений энергии импульсов мощности ИБР-2М (1 – эксперимент, 2 – моделирование) в режиме саморегулирования при прямоугольных колебаниях задающей реактивности (3) для трех наборов параметров МОС (а–в), соответствующих А, Б, В (см. табл. 2.) Средняя мощность реактора 2 МВт (а) и 1,75 МВт (б и в), расход теплоносителя 100 м<sup>3</sup>/ч, t – время

Таблица 2. Параметры трехкомпонентной быстрой МОС ИБР-2М для трех характерных видов переходных процессов, представленных на рис. 2:  $k_T = \sum_j k_{Tj}$  – суммарный коэффициент передачи МОС,  $T_{Tj}$  – временная константа  $j$ -й компоненты МОС,  $c_{Tj}$  – параметры нелинейности. Расход теплоносителя 100 м<sup>3</sup>/ч

Параметр МОС	Вариант А			Вариант Б			Вариант В		
Средняя мощность, МВт	2			1,75			1,75		
$j$	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$k_T = \sum_j k_{Tj}$ , $\beta_{и}/\text{МВт}$	-5,14			-2,24			-4,66		
$k_{Tj}$ , $\beta_{и}/\text{МВт}$	-5,91	1,59	-0,82	-2,55	1,24	-0,93	-5,34	1,38	-0,7
$T_{Tj}$ , с	7,60	1,02	0,46	10,19	0,82	0,37	12,32	1,05	0,3
$c_{Tj}$	—	—	—	-4,79	-2,2	-2,86	-1,04	0,88	3,28

через а.з., равном  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Изучались переходные процессы энергии импульсов, обусловленные прямоугольными периодическими колебаниями реактивности. Выделены три характерных вида переходных процессов: 1) стабильный; 2) стабильный с запаздыванием обратной связи; 3) с существенно колебательным характером (рис. 2). Наборы параметров МОС, соответствующие этим переходным процессам, приведены в табл. 2 (варианты А, Б, В). В общем случае отдельные компоненты МОС нелинейные.

### 3. СТРУКТУРА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ ИБР-2М И СТАТИСТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Автоматический регулятор мощности ИБР-2М построен на статистически оптимальном алгоритме. Подробный вывод статистически оптимального алгоритма АР ИБР-2М приведен в работе [8]. Здесь же рассматривается его краткое описание. Статистически оптимальный алгоритм обеспечивает минимум вероятного среднеквадратического относительного отклонения энергии будущего ( $n$ -го) импульса мощности на основании информации, полученной из предшествующих ( $k$ -х) импульсов мощности ( $k < n$ ). В действующей системе АР информации от предшествующих импульсов придается разный вес, и тем самым вводится принцип старения информации. В результате оптимальный алгоритм АР приобретает вид [9]

$$\Delta r_{An} = \frac{1}{\sum_{k=0}^{n-1} a_{n-k}^2} \sum_{k=0}^{n-1} a_{n-k}^2 (\Delta r_{Ak} - \Delta e_{ik}), \quad (1)$$

где  $\Delta r_{An}$ ,  $\Delta r_{Ak}$  — выраженные в долях  $\beta_{и}$  отклонения реактивности АР от среднего (базового) уровня, относящиеся к будущему ( $n$ -му) и предшествующим ( $k$ -м) импульсам мощности соответственно;  $\Delta e_{ik}$  — относительные отклонения энергии предшествующих импульсов мощности ( $k = 0$  соответствует началу набора автоматическим регулятором информации);  $a_{n-k}^2 \leq 1$  — параметр, зависящий от разности номеров импульсов  $n - k \geq 1$ , характеризующий степень старения информации от предшествующих импульсов мощности.

Формула (1) для импульсной системы связывает выходной сигнал АР  $\Delta r_{An}$  в будущем ( $n$ -м) импульсе со значениями входного сигнала АР  $(\Delta r_{Ak} - \Delta e_{ik})$ , соответствующими предшествующим импульсам с номерами  $k = 0, 1, \dots, n - 1$ , и с дискретными значениями импульсной переходной характеристики АР  $w_{An-k} = \left(1 / \sum_{k=0}^{n-1} a_{n-k}^2\right) a_{n-k}^2$ . Из формулы (1) следует, что импульсная характеристика АР, т.е. реакция АР на единичный импульс, подаваемый на АР в момент, соответствующий импульсу с номе-

ром  $m = 0$ , описывается выражением

$$w_{An} = \left( \frac{1}{\sum_{m=1}^n a_m^2} \right) \sum_{m=1}^n a_m^2, \quad (2)$$

где  $n \geq 1$ .

Таким образом, импульсная характеристика и, следовательно, структура АР определяются выбором функции  $a_{n-k}^2$  в формуле (1). В случае ИБР-2М принято, что более ранней информации придается меньший вес, с ростом индекса  $n - k$  параметр  $a_{n-k}^2$  уменьшается ( $a_0^2 = 1 > a_1^2 > a_2^2 > \dots$ ). Функция  $a_{n-k}^2$  описывается убывающей экспонентой:

$$a_{n-k}^2 = \exp[-(n-k)T_u/T_A], \quad (3)$$

где  $T_u$  — период импульсов мощности;  $T_A$  — постоянная времени экспоненциальной функции  $a_{n-k}^2$ . Из формулы (3) следует, что, начиная с номера импульса  $n > 5T_A/T_u$ , сумму  $\sum_{k=0}^{n-1} a_{n-k}^2$  в алгоритме (1) можно считать постоянной величиной. С учетом этого импульсная характеристика АР (2) ИБР-2М приобретает вид

$$w_{An} = (1 - e^{-T_u/T_A}) \sum_{m=1}^n e^{-mT_u/T_A}. \quad (4)$$

Это импульсная характеристика аperiodического звена с импульсной передаточной функцией

$$W_A^*(z) = \frac{\Delta r_A(z)}{\delta_A(z)} = (1 - e^{-T_u/T_A}) \frac{z^{-1}}{1 - e^{-T_u/T_A} z^{-1}}, \quad (5)$$

где  $\Delta r_A(z)$  и  $\delta_A(z)$  —  $z$ -изображения соответственно выходного и входного сигналов АР, рассматриваемых как функции, отличные от нуля лишь в моменты появления импульсов мощности. При соотношении  $T_A \gg T_u$  функция (5) принимает вид импульсной функции интегратора:

$$W_A^*(z) = \frac{\Delta r_A(z)}{\delta_A(z)} = \frac{T_u}{T_A} \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}}. \quad (6)$$

АР ИБР-2М представляет собой именно такой интегратор.

Значение  $T_A$  может устанавливаться различным, для чего используется соотношение  $T_A = 10\Delta$ , где  $\Delta$  — варьируемый параметр. В настоящее время принято  $\Delta = 0,2$ , т. е.  $T_A = 2$ , и коэффициент передачи АР в формуле (6) равен  $T_u/T_A = 0,1$ ,  $\Delta$  — параметр скорости АР: чем он больше, тем меньше скорость АР при одном и том же сигнале на его входе.

**3.1. Первый вариант сглаживания регулируемого параметра.** Регулируемый параметр  $\Delta e_{ин}$  пропускается через дополнительно введенный фильтр и превращается в сглаженный сигнал  $\Delta \tilde{e}_{ин}$ . В итоге на вход АР подается сглаженный сигнал  $\delta_{An} = -\Delta \tilde{e}_{ин}$ . Алгоритм сглаживания удовлетворяет статистически оптимальному критерию [10] и выражается формулой

$$\Delta \tilde{e}_{ин} = \Delta \tilde{e}_{ин-1} + \frac{1}{q}(\Delta e_{ин} - \Delta \tilde{e}_{ин-1}), \quad (7)$$

где  $q > 1$  — коэффициент сглаживания (при  $q = 1$   $\Delta \tilde{e}_{ин} = \Delta e_{ин}$ : фильтр не работает и сглаживания регулируемого параметра не проводится). Фильтру с алгоритмом (7) соответствует импульсная передаточная функция

$$W_{\sim}^*(z) = \frac{\Delta \tilde{e}_и(z)}{\Delta e_и(z)} = \frac{1}{\frac{q}{q-1} - z^{-1}}. \quad (8)$$

Структурная схема замкнутой системы АР ИБР-2М с данным вариантом сглаживания регулируемого параметра показана на рис. 3.

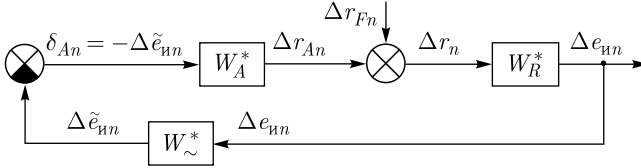


Рис. 3. Схема замкнутой системы АР реактора ИБР-2М:  $W_A^*$ ,  $W_R^*$ ,  $W_{\sim}^*$  — импульсные передаточные функции АР, реактора и фильтра соответственно;  $\Delta r_{Fn}$  — внешнее возмущение реактивности

**3.2. Второй вариант сглаживания регулируемого параметра.** Учитывается только информация, полученная из  $N$  предшествующих импульсов мощности, и ей придается наибольший вес ( $a_{n-k}^2 = 1$  при  $1 \leq n-k \leq N$  и  $a_{n-k}^2 = 0$  при  $n-k > N$ ) (рис. 4). Этому случаю соответствует следующий статистически оптимальный алгоритм АР:

$$\Delta r_{An} = \frac{\sum_{k=1}^N (\Delta r_{An-k} - \Delta e_{ин-k})}{N}. \quad (9)$$

Таким образом, выходной сигнал АР представляет собой среднеарифметическое значение  $N$  предшествующих входных сигналов. Из формулы (9) следует, что импульсная передаточная функция АР имеет вид

$$W_{A2}^*(z) = \frac{\Delta r_A(z)}{\Delta e_и(z)} = \frac{z^{-1} 1 - z^{-N}}{N 1 - z^{-1}}. \quad (10)$$



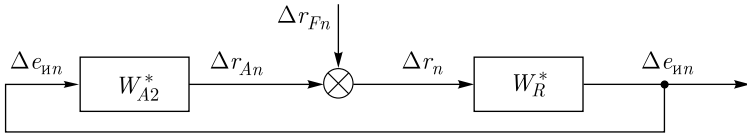


Рис. 4. Замкнутая система регулирования реактора ИБР-2М при равных информационных весах регулируемого параметра:  $W_{A2}^*$ ,  $W_R^*$  — импульсные передаточные функции АР и реактора соответственно;  $\Delta r_{Fn}$  — внешнее возмущение реактивности

Ниже, в разд.4, приведены результаты анализа динамики ИБР-2М с выбором оптимальных параметров АР. Рассматривались два алгоритма сглаживания регулируемого параметра: 1) со старением информации, в настоящее время он используется в системе АР ИБР-2М; 2) с равным информационным весом — статистически оптимальный алгоритм, потенциально возможный к применению на ИБР-2М.

#### 4. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ИБР-2М ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ АР. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ

Для АР ИБР-2М с параметрами МОС, соответствующими типичным переходным процессам, приведенными в табл.2, смоделированы переходные процессы мощности в режиме АР. Моделирование проводилось при возмущении реактивности в виде скачка  $0,1\beta_{и}$  при штатном значении параметра  $\Delta = 0,2$  и значениях коэффициента сглаживания фильтра  $q$  в диапазоне от 1 до 8 (рис. 5).

В результате обработки данных, представленных на рис. 5, были оценены основные показатели качества переходных процессов: длительности  $t_{д.п}$  и декременты затухания  $\chi$  в зависимости от значения коэффициента сгла-

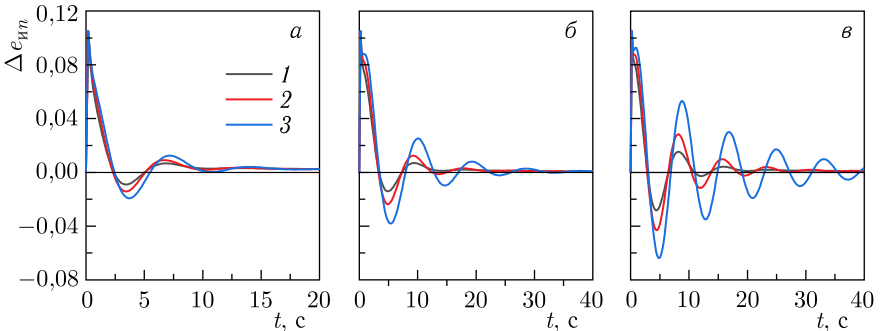


Рис. 5. Переходные процессы мощности ИБР-2М при скачке реактивности  $0,1\beta_{и}$  в режиме АР для трех наборов параметров МОС (а-в), соответствующих А, Б, В из табл. 2, при разных значениях коэффициента сглаживания  $q$ : 2 (1); 4 (2); 8 (3).

Средняя мощность реактора 2 МВт (а) и 1,75 МВт (б и в);  $t$  — время

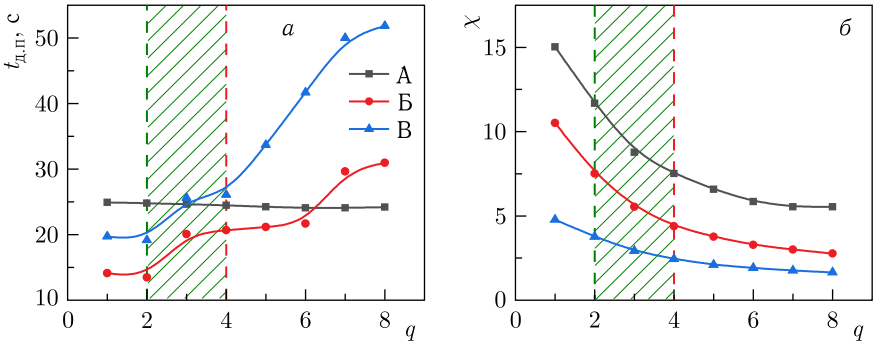


Рис. 6. Основные показатели качества переходных процессов мощности при скачке реактивности  $0,1\beta_{и}$  в зависимости от значения коэффициента сглаживания  $q$ : а) длительность переходных процессов мощности  $t_{д.п.}$ ; б) декремент затухания  $\chi$ . А, Б и В соответствуют трем наборам параметров МОС (см. табл. 2). Красная вертикальная линия соответствует действующему в настоящее время значению  $q$ , зеленая — перспективный кандидат

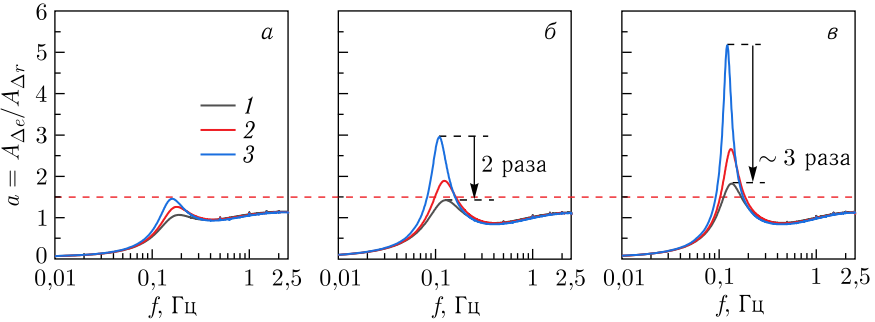


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики ИБР-2М в режиме АР для трех наборов параметров МОС (а–в), соответствующих А, Б, В из табл. 2, при разных значениях коэффициента сглаживания  $q$ : 2 (1); 4 (2); 8 (3);  $f$  — частота

живания  $q$ . Время регулирования (длительность переходного процесса  $t_{д.п.}$ ) определялось как минимальное время, за которое регулируемая величина  $\Delta e_{ин}$  с требуемой точностью станет близкой к заданной  $\Delta e_{и}^0$ . Чем меньше эта величина, тем лучше. Декремент затухания характеризует величину падения амплитуды в течение половины периода колебания. Чем больше декремент, тем лучше. Показатели качества переходных процессов мощности в зависимости от значения коэффициента сглаживания  $q$  приведены на рис. 6. На рис. 7, 8 даны амплитудно-частотные характеристики ИБР-2М, соответствующие трем вариантам переходных процессов (см. рис. 5), при разных значениях коэффициента сглаживания  $q$ : от 1 до 8.

На рис. 9 приведены основные показатели качества переходных процессов мощности в ИБР-2М при использовании статистически оптималь-

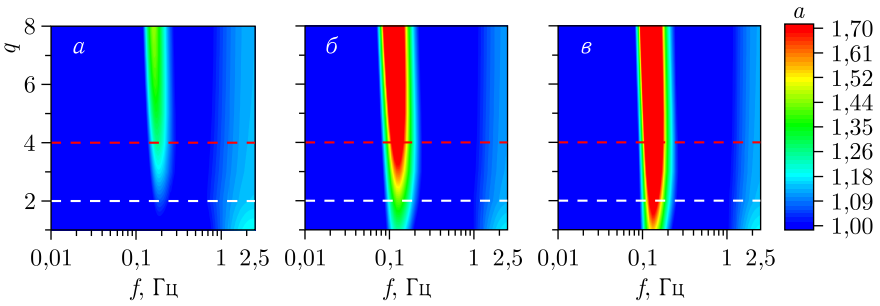


Рис. 8. Картограмма АЧХ ИБР-2М в режиме АР в зависимости от значения коэффициента сглаживания  $q$  для трех наборов параметров МОС (а–в), соответствующих А, Б, В из табл. 2. Виден четкий резонанс в диапазоне частот 0,1–0,2 Гц в рабочей зоне стабилизации

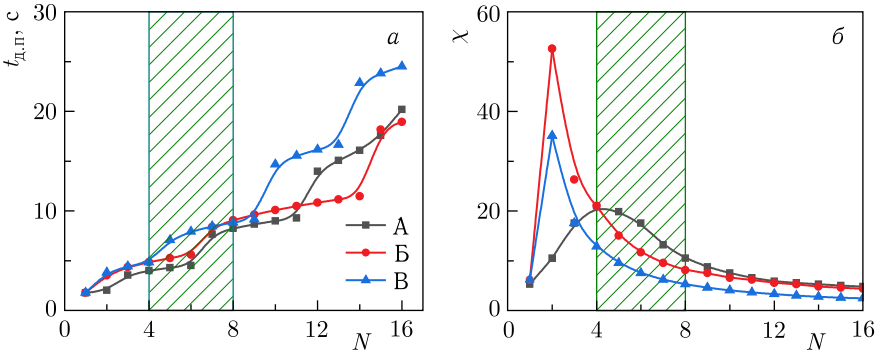


Рис. 9. Основные показатели качества переходных процессов мощности при скачке реактивности ( $\Delta r_F = 0,1\beta_{eff}$ ) в зависимости от значения коэффициента  $N$  нового АР: а) длительность  $t_{д.п.}$ ; б) декремент затухания переходных процессов мощности  $\chi$ . А, Б и В соответствуют трем наборам параметров МОС (см. табл. 2). Заштрихованная область — область оптимальных значений  $N$  с центром  $N = 6$

ного АР с усреднением данных с равными информационными весами, т. е. представлены результаты анализа для второго варианта сглаживания регулируемого параметра (см. разд. 3).

## ВЫВОДЫ

Рассмотрены два варианта работы статистически оптимального автоматического регулятора реактора ИБР-2М. При действующем на ИБР-2М варианте АР, когда используется усреднение данных со старением информации, видно, что параметры переходного процесса мощности сильно зависят от значения коэффициента сглаживания  $q$ : с увеличением  $q$  качество переходного процесса ухудшается. Это четко прослеживается при всех режимах работы реактора при разной энерговыработке, кроме «нулевой»

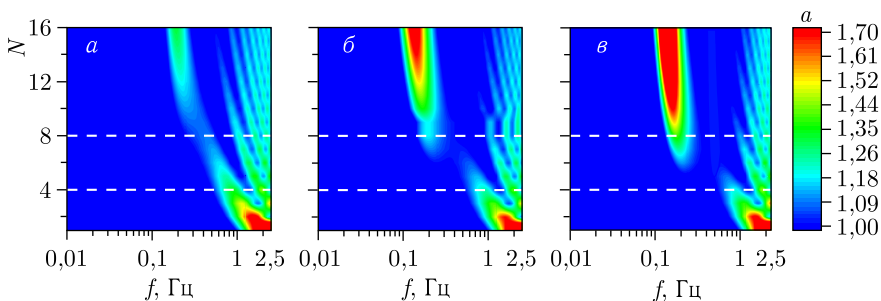


Рис. 10. Картограмма АЧХ ИБР-2М в зависимости от значения коэффициента  $N$  нового автоматического регулятора для трех наборов параметров МОС (а–в), соответствующих А, Б, В из табл. 2. Виден четкий резонанс в диапазоне частот 0,1–0,3 Гц, но вдали от рабочей зоны стабилизации

(свежее топливо). Для свежего топлива длительность переходного процесса с изменением  $q$  почти не меняется, а декремент затухания максимальный. Состоянию реактора в этот период его работы соответствовало достаточно большое значение суммарного коэффициента быстрой МОС  $k_T = -5,14 \beta_n/\text{МВт}$  (см. табл. 2). При таком значении  $k_T$  низкочастотная колебательность реактора минимальная [11]. Таким образом, в реакторе со свежим топливом показатели качества переходных процессов наилучшие, но, как видно из представленных выше данных, эти показатели с энерговыработкой ухудшаются. Наилучшие значения  $q$  для действующей на реакторе системы АР находятся в диапазоне 2–4. В настоящее время значение  $q$  равно 4, т. е. существует некоторая перспектива на улучшение шумового состояния ИБР-2М с переводом числа усреднений  $q$  на значение 2.

Для второго варианта статистически оптимального АР ИБР-2М при постоянной информационной ценности регулируемого параметра  $N$  расчеты показывают, что оптимальное значение коэффициента  $N$  находится в диапазоне 4–8 (рис. 10), не выше и не ниже. Наилучший вариант работы АР реализуется при  $N = 6$ . Для этого варианта, как видно из рис. 10, есть некоторый запас устойчивости реактора как к низкочастотным, так и к высокочастотным колебаниям мощности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pepeyyshev Yu. N., Sumkhuu D.* Optimization of Automatic Power Control of Pulsed Reactor IBR-2M in the Presence of Instability // Nucl. Engin. Technol. 2022. V. 54, No. 8. P. 2877–2882; doi: 10.1016/j.net.2022.03.017.
2. *Dragunov Yu. G., Tretyakov I. T., Lopatkin A. V. et al.* Modernization of the IBR-2 Pulsed Research Reactor // At. Energy. 2012. V. 113, No. 1. P. 29–34.
3. *Pepeyyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* Model of the IBR-2M Pulsed Reactor Dynamics for Investigating Transition Processes in a Wide Range of

- Power Variation // *Ann. Nucl. Energy*. 2015. V. 85. P. 488–493; doi: 10.1016/j.anucene.2015.06.002.
4. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D., Sangaa D.* Dynamics Model of the IBR-2M Pulsed Reactor for Analysis of Fast Transition Processes // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2015. V. 12, No. 3. P. 435–438; doi: 10.1134/s1547477115030188.
  5. *Marachev A. A., Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* Analysis of Dynamics of the IBR-2M Reactor with Statistically Optimal Automatic Regulator // *At. Energy*. 2017. V. 123, No. 3. P. 172–175; doi: 10.1007/s10512-018-0327-3.
  6. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* IBR-2M Reactor Power Feedback Parameters Evaluation Using Square Reactivity Oscillations // *At. Energy*. 2017. V. 122, No. 2. P. 75–80; doi: 10.1007/s10512-017-0238-8.
  7. *Pepelyshev Yu. N., Sumkhuu D.* On the Cyclic Change in the Dynamics of the IBR-2M Pulsed Reactor // *Nucl. Engin. Technol.* 2023. V. 55, No. 5. P. 1665–1670; doi: 10.1016/j.net.2023.01.004.
  8. *Popov A. K., Marachev A. A.* On Statistically Optimal Algorithms of Regulation of a Pulsed Reactor // *Nucl. Waste Research: Siting, Technology and Treatment* / Ed. A. P. Lattefer. New York: Nova Science Publ., Inc., 2008. P. 107–141.
  9. *Понов А. К.* О статистически оптимальном регулировании энергии импульсов быстрого реактора // *АЭ*. 1971. Т. 31, вып. 3. С. 269.
  10. *Marachev A. A., Pepelyshev Yu. N., Popov A. K.* Statistically Optimal Filter for IBR-2 Mean Power Estimation // *Ann. Nucl. Energy*. 2008. V. 35. P. 1779–1784.
  11. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D., Rogov A. D.* On the Limits of Oscillatory Instability of Pulsed Reactors of Periodic Operation // *Phys. At. Nucl.* 2021. V. 84, No. 8. P. 1445–1458; doi: 10.1134/s1063778821080172.

Получено 24 ноября 2023 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 15.01.2024.

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

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,78. Тираж 110 экз. Заказ № 60806.

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

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)