

P13-2021-30

Ю. Н. Пепелышев, Д. Сумхуу

ОПТИМИЗАЦИЯ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
МОЩНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА **ИБР-2М**  
ПРИ НАЛИЧИИ НЕСТАБИЛЬНОСТИ

Направлено в журнал «Атомная энергия»

Пепельшев Ю. Н., Сумхуу Д.

P13-2021-30

Оптимизация автоматического регулирования мощности импульсного реактора ИБР-2М при наличии неустойчивости

Представлены основные результаты расчетно-экспериментальной оптимизации системы автоматического регулирования (АР) мощности импульсного реактора ИБР-2М при наличии высокого уровня колебательной неустойчивости. Оптимизация параметров системы АР позволила значительно уменьшить влияние случайных и детерминированных колебаний реактивности на шумы энергии импульсов, а также значительно уменьшить проявление колебательной неустойчивости реактора. В результате безопасность и надежность работы реактора существенно возросла.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2021

Pepelyshev Yu. N., Sumkhuu D.

P13-2021-30

Optimization of Automatic Power Control System of the IBR-2M Pulsed Reactor in the Presence of Instability

The paper presents the main results of computational and experimental optimization of the automatic power control system (AR) of the IBR-2M pulsed reactor in the presence of a high level of oscillatory instability. Optimization of the parameters of the AR made it possible to significantly reduce the influence of random and deterministic oscillations of reactivity on the noise of the pulse energy, as well as to sharply reduce the manifestation of the oscillatory instability of the reactor. As a result, the safety and reliability of operation of the reactor has increased substantially.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2021

## ВВЕДЕНИЕ

Исследования импульсного реактора ИБР-2М показали, что высоким (до ~50%) флуктуациям энергии импульсов соответствует сложный частотный спектр колебаний. Помимо компонента белого шума и ряда гармонических колебаний он включает в себя значительный низкочастотный компонент с периодом 10 с. Низкочастотные колебания интерпретируются как автоколебания, связанные с ослаблением в процессе работы реактора быстрой мощностной обратной связи (МОС) [1]. Одним из способов уменьшения амплитуды автоколебаний является оптимизация параметров автоматического регулирования (АР) мощности. В работе представлены основные результаты исследования оптимизации системы АР при наличии высокого уровня колебательной неустойчивости.

### 1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ИБР-2М

Импульсный реактор периодического действия ИБР-2М работает в Дубне (Россия) с 2012 г. ИБР-2М представляет собой модернизированную версию ИБР-2, выведенного из эксплуатации в 2006 г. в связи с выработкой ресурса [2]. Основные параметры реактора ИБР-2М приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры реактора 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 максимум в импульсе	~ 10 <sup>13</sup> ~ 10 <sup>16</sup>

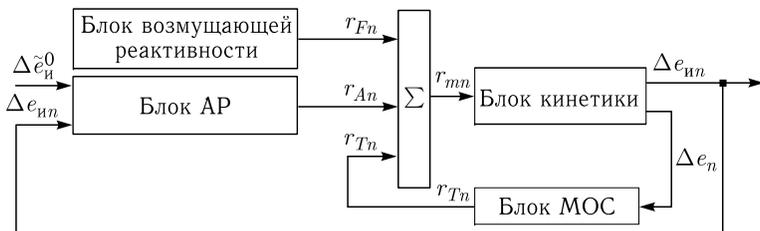


Рис. 1. Блок-схема модели динамики ИБР-2М в штатном режиме работы с системой АР

Оптимизация параметров АР основана на модельном представлении динамики реактора как импульсной системы АР. Модель реактора построена на основе блочной структуры и представляет собой нелинейную систему АР (рис. 1). Модель включает в себя блок кинетики, описывающей нелинейную зависимость мощности реактора от реактивности, блок МОС, обусловленной разогревом реактора и характеризующейся нелинейной зависимостью от реактивности, блок АР и блок возмущающей реактивности. Последний позволяет моделировать разнообразные изменения реактивности. Подробное описание модели изложено в работах [3–5]. Линеаризованные части системы характеризуются дискретными передаточными функциями, полученными в результате  $Z$ -преобразования переменных.

Математическая модель динамики ИБР-2М позволяет проводить анализ как переходных процессов изменения мощности, так и шумов в режимах саморегулирования (без АР) и автоматического регулирования (с включенной АР). Для оптимизации параметров АР необходимо моделирование работы реактора при совместной работе системы АР и быстрой МОС. Для удобства моделирования реактивность  $r$  представлена в импульсной доле запаздывающих нейтронов  $\beta_i$  [6]. В качестве регулируемого параметра ИБР-2М в модели была принята относительная амплитуда импульса  $p_m = P_m/P_m^0$ , где  $P_m$ ,  $P_m^0$  — амплитуда импульса и ее базовое значение соответственно. Блок АР рассматривается далее как дискретная подсистема в общей структуре модели динамики ИБР-2М.

## 2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И УРАВНЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА

Основное назначение системы АР ИБР-2М состоит в автоматическом выводе реактора на заданный уровень мощности и стабилизации мощности на этом же уровне. Алгоритм формирования реактивности АР обеспечивает статистически оптимальное поддержание уровня мощности, а именно достижение минимума среднеквадратического отклонения энергии для будущего импульса мощности на основании информации, соответствующей предыдущим импульсам [5]. Предполагалось, что на реактор воздействует случайное возмущение реактивности с нормальным законом распределе-

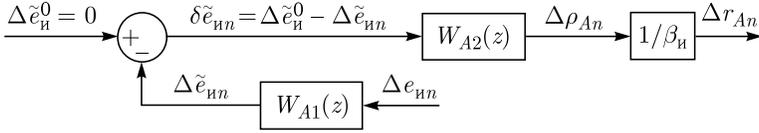


Рис. 2. Блок-схема АР ИБР-2М:  $W_{A1}(z)$ ,  $W_{A2}(z)$  — импульсные передаточные функции фильтра и блока управления АР соответственно

ния, статистическая ошибка корректирующей реактивности также подчиняется нормальному распределению.

Введено понятие степени старения информации. В результате показано, что АР должно представлять собой интегрирующее звено, на вход которого подается отклонение энергии текущего импульса мощности от его базового значения. В целом система АР представляет собой регулирующий стержень с шаговым электродвигателем и блоком его управления (рис. 2) и блоком сглаживания. Блок сглаживания — это инерциальное звено, а шаговый двигатель совместно с регулирующим стержнем и блоком управления — интегрирующее звено [5]. Шаговый двигатель через механический привод перемещает бериллиевый регулятор реактивности.

Блок сглаживания формирует по инерционному закону из входного сигнала, представляющего собой последовательность импульсов с амплитудами  $p_{mn-1}$ ,  $p_{mn}$ ,  $p_{mn+1}$  и т. д., непрерывный выходной сигнал  $\tilde{p}_n$  ступенчатой формы. Высота ступени  $\tilde{p}_n$  в интервале времени между импульсами с номерами  $n$  и  $n + 1$  формируется по закону

$$\tilde{p}_n = \tilde{p}_{n-1} + \frac{1}{q} (p_n - \tilde{p}_{n-1}), \quad (1)$$

где  $q$  — коэффициент сглаживания. Предусмотрен выбор 32 фиксированных значений  $q$ , равных 1, 2, 3... 32. После блока сглаживания формируется непрерывный ступенчатый сигнал управления двигателем АР:

$$\Delta\tilde{p}_n = \tilde{p}^0 - \tilde{p}_n = 1 - \tilde{p}_n. \quad (2)$$

В блоке управления двигателем АР предусмотрен выбор четырех фиксированных значений коэффициентов пропорциональности между разбалансом  $\Delta\tilde{p}$  и скоростью шагового двигателя. Это осуществляется выбором одного из четырех возможных значений параметра  $\Delta$  (0,05; 0,10; 0,15; 0,20), т. е. выбирается соответствие между разбалансом  $\Delta\tilde{p}$  (когда  $\Delta\tilde{p} = \Delta$ ) и скоростью шагового двигателя  $v_A = 167$  шагов/с. Каждый шаг двигателя приводит к изменению реактивности АР на  $m_A = 6,16 \cdot 10^{-4} \beta_{и}$ . В результате реактивность, вносимая двигателем, описывается уравнением

$$\frac{d\rho_A}{dt} = k_A \Delta\tilde{p}. \quad (3)$$

Здесь  $k_A$  — коэффициент передачи двигателя и стержня АР (в  $\beta_{и}/с$ ):

$$k_A = \frac{v_A m_A}{\Delta}, \quad (4)$$

где  $v_A m_A = 0,1 \beta_{и}/с$ ,  $\beta_{и} = 1,57 \cdot 10^{-4}$ . В модели динамики ИБР-2М вместо уравнений АР (1)–(4) использованы полученные из них уравнения для дискретных моментов времени (5)–(7), в которых в качестве переменных использованы относительные отклонения:

$$\Delta \tilde{e}_{ин} = \Delta \tilde{e}_{ин-1} + \frac{1}{q} (\Delta e_{ин} - \Delta \tilde{e}_{ин-1}), \quad (5)$$

$$\delta \tilde{e}_{ин} = \Delta \tilde{e}_{ин}^0 - \Delta \tilde{e}_{ин}, \quad (6)$$

$$\Delta r_{An} = \Delta r_{An-1} + \beta_{и} k_A T \delta \tilde{e}_{ин-1}. \quad (7)$$

### 3. ПАРАМЕТРЫ БЫСТРОЙ МОС

Поскольку динамика реактора существенно зависит от параметров быстрой МОС, экспериментально были оценены значения этих параметров. Изучались переходные процессы изменения энергии импульсов, обусловленные прямоугольными периодическими колебаниями реактивности в режиме саморегулирования [7, 8]. Измерения проводились при двух значениях энерговыработки реактора, полученных в 2015 и 2019 гг. (рис. 3).

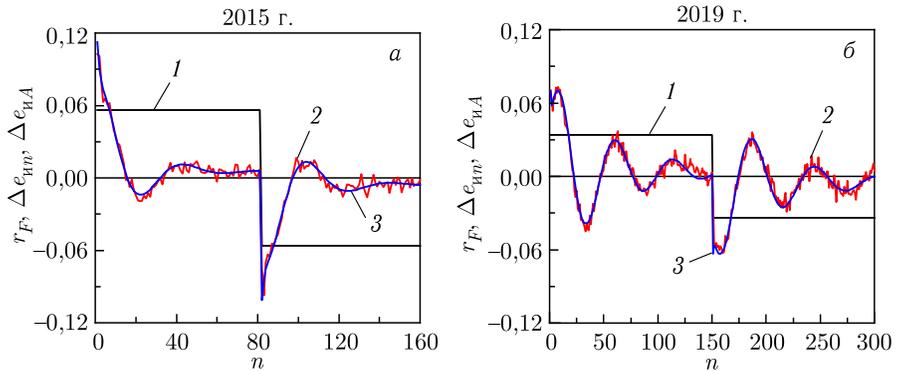


Рис. 3. Переходные процессы при прямоугольных колебаниях задающей реактивности  $r_F$  (1) в режиме саморегулирования при энерговыработке 740 МВ·сут (а) и 1500 МВ·сут (б).  $\Delta e_{ин}$ ,  $\Delta e_{ин}^A$  — относительное отклонение энергии импульса, зарегистрированное (2) и вычисленное (3) соответственно,  $n$  — номер импульса мощности

### 4. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АР

Для выбора оптимальных параметров АР использовалась следующая схема. В рамках математической модели динамики варьировались все значения двух основных параметров АР: коэффициента сглаживания фильтра  $q$  и коэффициента пропорциональности  $\Delta$  между разбалансом  $\Delta \tilde{p}_n$  и скоростью шагового двигателя  $\nu_A$ . Варьирование параметров АР проводи-

лось для двух комбинаций параметров быстрой МОС, соответствующих состоянию реактора в 2015 и 2019 гг. Значения варьируемых параметров приведены в табл. 2. Исследовалось влияние параметров АР на переходные процессы мощности и на передаточную функцию реактора.

Таблица 2. **Параметры АР и быстрой МОС ИБР-2М для оптимизации**

Параметр	Диапазон изменения параметра	Действующее значение
Коэффициент сглаживания фильтра $q$	1, 2, 3 ... 32	8
Коэффициент пропорциональности $\Delta$ между разбалансом $\Delta\tilde{p}_n$ и скоростью шагового двигателя $v_A$	0,05; 0,10; 0,15; 0,20	0,2
Суммарный коэффициент передачи быстрой МОС $k_T = \sum_j k_{Tj}, \beta_i/\text{МВт}$ : в 2015 г. в 2019 г.	-5,14 -4,67	Постепенное уменьшение по модулю

## 5. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АР НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ МОЩНОСТИ

В этом разделе даны результаты анализа влияния параметров АР на переходные процессы мощности при регулярных и случайных возмущениях реактивности:

- регулярное возмущение в виде скачка  $\Delta r_F = -0,1\beta_i$ ;
- случайное возмущение в виде белого шума с дисперсией  $\sigma_r^2 = 0,05^2 \beta_i^2$ .

Все процессы моделировались в режиме как саморегулирования, так и автоматического регулирования мощности.

**5.1. Регулярное возмущение реактивности в виде скачка.** В качестве примера на рис. 4 представлены переходные процессы изменения энергии импульсов при скачке реактивности в режимах саморегулирования и автоматического регулирования при разных значениях энерговыработки. Там же показаны параметры качества переходного процесса.

При моделировании оценивались следующие прямые показатели качества переходных процессов: время регулирования или длительность переходного процесса  $t_n$  и максимум переходного процесса  $\Delta e_{i\max}$ . На рис. 5 приведены показатели качества переходных процессов в режиме автоматического регулирования в зависимости от параметров  $q$  и  $\Delta$  при разной энерговыработке.

Из рис. 5, а видно, что для энерговыработки 1500 МВт·сут при значениях  $q < 4$  длительность переходного процесса увеличивается с ростом  $\Delta$ , при  $q = 8$  — практически не меняется при разных значениях  $\Delta$ , а при  $q > 8$  — находится вне допустимого уровня и очень быстро растет при

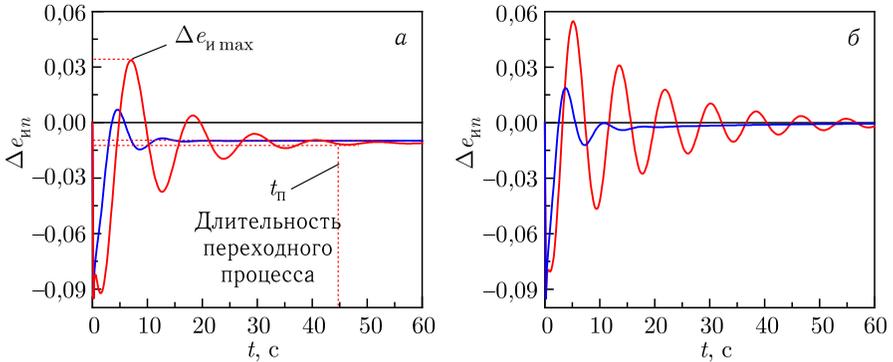


Рис. 4. Относительное отклонение энергии импульсов  $\Delta e_{ин}$  при скачке реактивности (в долях  $\beta_{и}$ )  $\Delta r_F = -0,1$  в режимах саморегулирования (а) и автоматического регулирования (б) при энерговыработке реактора 740 МВт·сут (1) и 1500 МВт·сут (2);  $t$  — время. Параметры АР:  $q = 8$  и  $\Delta = 0,2$  (штатные значения)

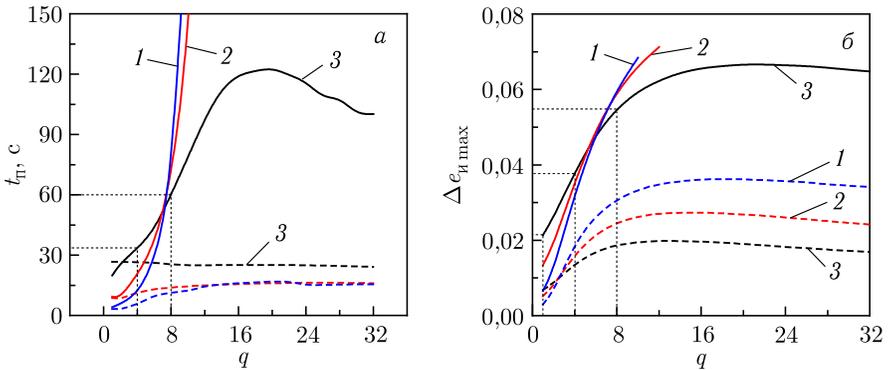


Рис. 5. Время регулирования (а) и максимум относительного отклонения энергии импульсов (б) в зависимости от параметров  $q$  и  $\Delta$  при энерговыработке 740 и 1500 МВт·сут (штриховая и сплошная кривые соответственно):  $\Delta = 0,05$  (1),  $\Delta = 0,1$  (2) и  $\Delta = 0,2$  (3)

$\Delta < 0,2$ . Лучший по качеству переходный процесс наблюдается при  $q = 1$ , т. е. при отсутствии блока сглаживания АР. Из соображений безопасности этот вариант невозможен. С ростом  $q$  колебательность увеличивается. С ростом энерговыработки при  $q > 11$  и  $\Delta < 0,2$  наблюдается автоколебательный процесс, при котором амплитуда колебаний с течением времени увеличивается и выходит на большой асимптотический уровень. Таким образом, если учитывать лишь регулярные возмущения реактивности, то целесообразно использовать значения параметров  $q < 4$  и  $\Delta = 0,2$ . Кроме того, моделирование показало, что переходные процессы с ростом энерговыработки ухудшаются в режиме как саморегулирования, так и автоматического регулирования.

**5.2. Амплитудно-частотная характеристика ИБР-2М в зависимости от параметров сглаживания ( $q$ ) и быстродействия блока АР ( $\Delta$ ).** Рассматривается воздействие на реактор гармонических колебаний реактивности с частотой  $f$  вида  $\Delta r_F = A_r \sin(2\pi ft + \varphi_r)$ . При таком воздействии относительное отклонение энергии импульсов будет также синусоидальным  $\Delta e_{и} = A_e \sin(2\pi ft + \varphi_e)$  с той же частотой, что и частота реактивности, но с амплитудой  $A_e$  и фазой  $\varphi_e$ , зависящими от частоты  $f$ . Амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) реактора оценивали в виде  $a(f) = A_e(f)/A_r(f)$ , а фазово-частотную — в виде  $\Delta\varphi(f) = \varphi_e(f) - \varphi_r(f)$ . В данном случае было принято  $\varphi_r(f) = 0$  и  $\Delta\varphi(f) = \varphi_e(f)$ . На рис.6 приведены результаты моделирования АЧХ ИБР-2М в режиме АР в зависимости от коэффициента сглаживания  $q$  при двух значениях параметра скорости АР:  $\Delta = 0,05$  и  $0,2$  и при энерговыработке 740 МВт·сут (2015 г.) и 1500 МВт·сут (2019 г.). Красными линиями на рис.6 обозначены имеющиеся в настоящее время АЧХ ИБР-2М.

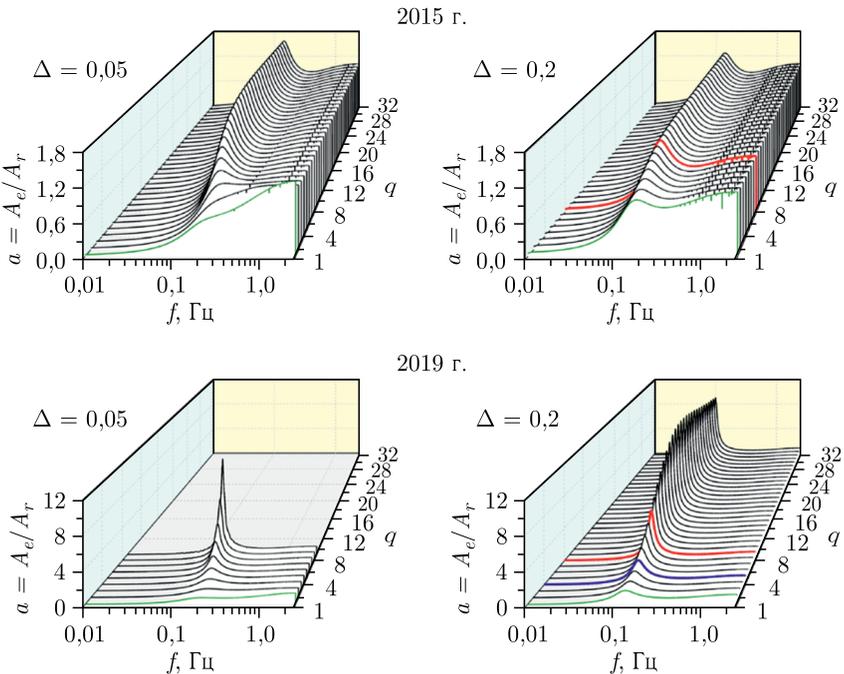


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика ИБР-2М в режиме АР в зависимости от коэффициента сглаживания  $q$  при двух значениях параметра скорости АР ( $\Delta = 0,05$  и  $0,2$ ) при энерговыработке: а) 740 МВт·сут (2015 г.); б) 1500 МВт·сут (2019 г.). Красной линией отмечена АЧХ при штатных значениях  $q = 8$ ,  $\Delta = 0,2$

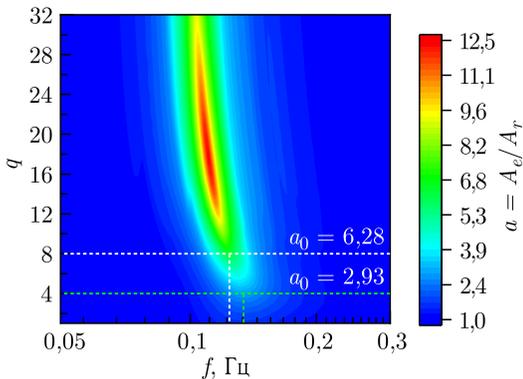


Рис. 7. Картограмма АЧХ ИБР-2М в режиме АР при мощности 2 МВт при изменении коэффициента сглаживания  $q$  при штатном значении параметра скорости АР  $\Delta = 0,2$  и энерговыработке 1500 МВт·сут (2019 г.). Пунктирной линией отмечены амплитуды резонанса при штатном значении  $q = 8$  и рекомендуемом  $q = 4$

На рис. 7 приведена картограмма АЧХ ИБР-2М в режиме АР при мощности 2 МВт в зависимости от коэффициента сглаживания  $q$  при постоянном значении параметра скорости АР  $\Delta = 0,2$  и энерговыработке 1500 МВт·сут (2019 г.).

На рис. 8 показаны АЧХ ИБР-2М при параметрах МОС, соответствующих работе реактора в 2015 и 2019 гг., и изменение амплитуды резонанса в АЧХ при изменении параметра  $q$ .

Из рис. 6–8 видно, что в АЧХ реактора существует резонансная область на частоте  $\sim 0,1$  Гц, а пик резонанса  $a_0$  сильно зависит от параметров быстрой МОС.

Анализ данных показывает, что пик амплитуды резонанса при  $1 \leq q \leq 11$  линейно растет с увеличением  $q$  и при  $q > 11$  становится практически постоянным (при  $\Delta = 0,2$ ). При  $\Delta < 0,2$  и  $1 \leq q \leq 10$  резонансный пик также растет с увеличением  $q$  по линейному закону, но

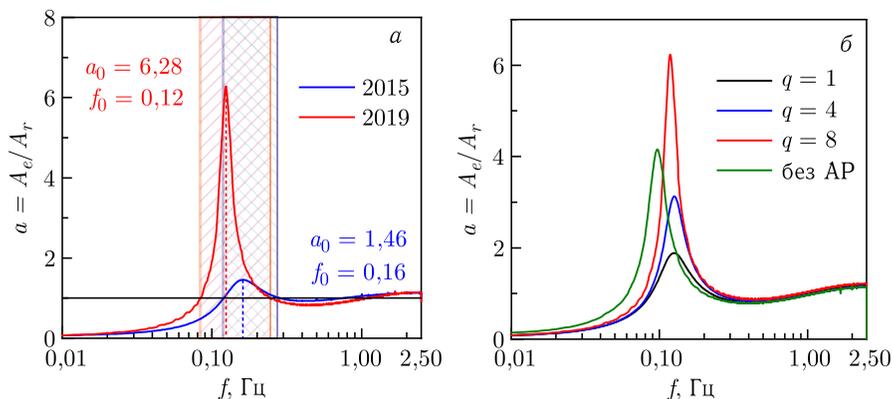


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики ИБР-2М в режиме АР в разные периоды работы реактора при штатных значениях параметров АР  $q = 8$ ,  $\Delta = 0,2$  (а) и в штатном режиме при  $\Delta = 0,2$ , но при разных значениях параметра  $q$  (б). Виден резонанс в области частоты 0,1 Гц

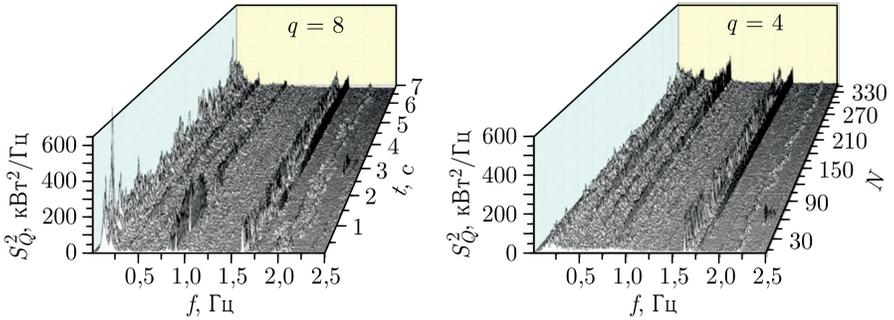


Рис. 9. Спектральная плотность колебаний энергии импульсов ИБР-2М при разных значениях коэффициента сглаживания:  $q = 8$  (а) и  $4$  (б)

более сильно, чем в предыдущем случае. При  $q > 10$  состояние реактора неустойчиво и не поддается модельным расчетам.

Для сравнения расчетного и реального изменения резонанса АЧХ в колебаниях энергии импульсов на рис. 9 приведены спектральные плотности колебаний энергии импульсов, измеренные в реакторных циклах до и после изменения коэффициента сглаживания  $q$  (было  $q = 8$ , стало  $q = 4$ ). Из рис. 9 отчетливо видно, что низкочастотный колебательный компонент спектра ( $f < 0,5$  Гц) при уменьшении  $q$  до четырех существенно изменился (в два раза практически) по расчету.

**5.3. Случайные возмущения реактивности.** На ИБР-2М воздействует множество источников случайных возмущений реактивности, например вибрации лопастей подвижных отражателей, вибрации кассет и твэлов в активной зоне, различного рода колебания со стороны системы охлаждения активной зоны и т. д. Из-за высокой чувствительности реактора к реактивности полные колебания энергии импульсов велики (размах

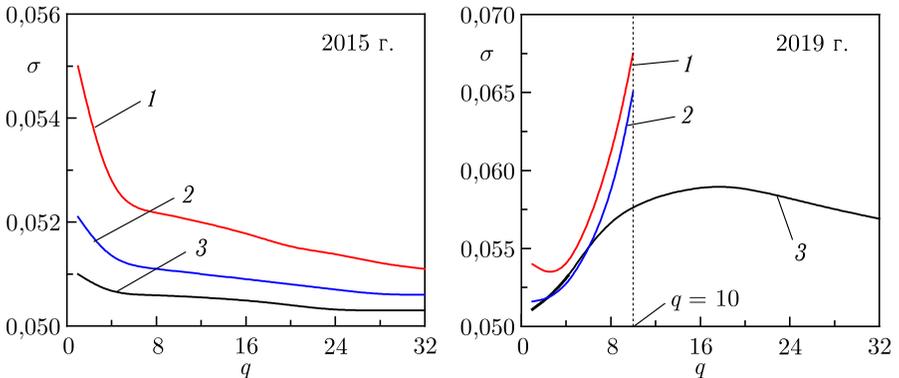


Рис. 10. Среднеквадратическое отклонение энергии импульсов мощности  $\sigma$  как функция параметра фильтра  $q$ : 1 —  $\Delta = 0,05$ ; 2 —  $\Delta = 0,1$ ; 3 —  $\Delta = 0,2$

колебаний равен  $\sim 50\%$ ). На рис. 10 показаны зависимости среднеквадратических отклонений энергии импульсов при случайных возмущениях реактивности с дисперсией  $\sigma_r^2 = 0,05^2 \beta_{\text{и}}^2$  при разных значениях параметров АР и МОС. Из рис. 10 видно, что при случайных возмущениях реактивности при  $q = 4$  для обоих наборов параметров МОС величина  $\sigma$  уменьшается с ростом  $\Delta$ .

## 6. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Из анализа переходных процессов при регулярных возмущениях реактивности следует, что наилучшие переходные процессы соответствуют следующим значениям параметров АР:  $q \leq 4$  и  $\Delta \leq 0,2$ . Идеальные значения параметров АР для сглаживания переходных процессов  $q = 1$  (блок сглаживания отсутствует) и  $\Delta = 0,05$  (скорость двигателя АР выбрана наибольшей) реально не могут быть использованы, поскольку не отражают всю гамму подавления колебаний мощности.

Из анализа переходных процессов при случайных, а также регулярных синусоидальных возмущениях реактивности, имеющих место при нормальной работе реактора, следует, что целесообразно выбрать значения параметров АР, как и в предыдущем случае, равными  $q \leq 4$  и  $\Delta \leq 0,2$ . Указанным выше параметрам соответствует наилучшая оптимизация АР.

Ослабление быстрой МОС, имеющей место в процессе работы реактора, приводит к усилению в АЧХ реактора резонанса на частоте 0,1 Гц. Возможно уменьшение амплитуды резонанса вдвое при уменьшении параметра  $q = 8$  до  $q \leq 4$ .

В результате исследований показано, что оптимальные значения параметров АР равны  $q \leq 4$  и  $\Delta \leq 0,2$ . Это справедливо как при скачках реактивности, случайном шуме, гармонических колебаниях, так и при проявлениях резонансов в активной зоне.

В целом оптимизация параметров системы АР ИБР-2М позволила значительно уменьшить как влияние случайных и детерминированных колебаний реактивности на шумы энергии импульсов, так и проявление колебательной неустойчивости реактора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д., Рогов А. Д. О пределах колебательной неустойчивости импульсных реакторов периодического действия // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. «Физика ядерных реакторов»*. 2020. № 5. С. 4–18.
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. Pepelyshev 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.
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.

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, iss. 3. P. 172–175.
6. *Бондаренко И.И., Стависский Ю.Я.* Импульсный режим работы быстрого реактора // *Ат. энергия.* 1959. Т.7, вып.5. С. 417–420.
7. *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.
8. *Пепельшев Ю.Н., Сумхуу Д.* О циклическом изменении динамики импульсного реактора ИБР-2М. Препринт ОИЯИ Р13-2021-11. Дубна, 2021.

Получено 13 июля 2021 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 28.07.2021.

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

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,78. Тираж 200 экз. Заказ № 60216.

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/)