

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

99-200

P13-99-200

Е.А.Бондарченко, Ю.Н.Пепельшев, А.К.Попов

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА
НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ МОЩНОСТИ
РЕАКТОРА ИБР-2

Направлено в журнал «Annals of Nuclear Energy»

1999

С помощью модели реактора ИБР-2, основанной на блочной структуре с z -преобразованием переменных и экспериментально определенных параметрах обратных связей вычислены переходные процессы мощности при различных значениях параметров автоматического регулятора мощности (АР). Показано, что при регулярных возмущениях реактивности наилучшие переходные процессы соответствуют наибольшей скорости АР при устранении блока сглаживания АР. Даны рекомендации выбора параметров АР при наличии случайных возмущений реактивности, имеющих место при нормальной работе реактора ИБР-2.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1999

Перевод авторов

Bondarchenko E.A., Pepelyshev Yu.N., Popov A.K.
Influence of the Automatic Regulator Parameters
on the Power Transition Processes of the IBR-2 Reactor

P13-99-200

With the help of the IBR-2 reactor models based on a block structure with z -transformation of variable and experimentally determined parameters of feed-backs, the power transition processes at various values of parameters of the automatic regulator (AR) are calculated. It is shown, that at regular disturbances of a reactivity the best transition processes correspond to the greatest speed of the AR while the AR smoothing-unit is eliminated. The recommendations of selection of the AR parameters are given if there are random disturbances of a reactivity which have place at normal operation of the IBR-2 reactor.

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

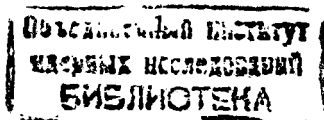
1. Введение

Реактор ИБР-2 оснащен системой автоматического регулирования мощности (АР). Основная задача АР состоит в автоматическом выводе реактора на заданный уровень средней мощности и стабилизации мощности реактора на заданном уровне. Структура и параметры АР существенно влияют на переходные процессы мощности. На этапе проектирования ИБР-2 был выведен алгоритм формирования реактивности АР, обеспечивающий статистически оптимальное поддержание уровня мощности, а именно - достижение минимума среднеквадратического отклонения энергии для будущего импульса мощности на основании информации, полученной в предыдущих импульсах [1]. При выводе алгоритма АР предполагалось, что на реактор воздействует случайное возмущение реактивности с нормальным законом распределения. Предполагалось также, что АР оценивает значения реактивности, соответствующие предыдущим импульсам мощности, с некоторой статистической ошибкой измерения, также характеризующейся нормальным законом распределения. Кроме того, было введено понятие степени "старения" информации в АР. В результате было показано, что АР должен представлять из себя интегрирующее звено, на вход которого подается отклонение энергии текущего импульса мощности от его базового значения. В штатный АР ИБР-2 помимо регулирующего стержня с шаговым двигателем и его блоком управления входит также блок сглаживания. Выходной сигнал блока сглаживания поступает на блок управления шаговым двигателем и формируется путем сглаживания отклонений энергии импульсов мощности относительно базового значения. Блок сглаживания представляет собой инерционное звено, а шаговый двигатель совместно с регулирующим стержнем и блоком управления - интегрирующее [2].

В принятой идеологии передаточная характеристика обратной связи реактора по АР представляет собой по сути некоторый фильтр низких частот, обеспечивающий достаточно хорошую стабилизацию мощности реактора ИБР-2 в среднем. Естественно, что это возможно только при условии, если спектр возмущений реактивности (детерминированных или случайных) лежит в полосе пропускания АР. Исследования, проведенные на стадии физического и энергетического пусков реактора, а также на стадии его эксплуатации позволили получить ряд дополнительных данных, которые не были известны при проектировании АР. Это, прежде всего, следующее.

Из-за высокой чувствительности реактора к случайным возмущениям реактивности, вызванным например, вибрациями подвижных отражателей, дрожанием топливных кассет, флуктуациями температуры и расхода натрия в активной зоне, реактор ИБР-2 имеет сравнительно высокие флуктуации энергии импульсов (до $\pm 40\%$). При этом реальный спектр колебаний энергии импульсов представлен не только компонентой белого шума, но и рядом детерминированных колебаний гармонического типа на всех частотах вплоть до критической частоты Найквиста (2,5 Гц), т.е. на частотах, существенно больших граничной частоты реакции АР.

Кроме того, на стадии проектирования не были известны параметры мощностной обратной связи. Как оказалось, для ИБР-2 характерны три компоненты быстрой мощностной обратной связи (одна из них положительна) с временными константами от ~ 10 до 0,2 с.



Выбор структуры и параметров АР, учитывающий все особенности работы реактора, крайне важен, т.к. без АР реактор находится вблизи границы устойчивости [3]. Запас устойчивости по какому-либо параметру обычно оценивают как отношение его значения, соответствующего состоянию реактора на границе устойчивости, к его значению, определенному для исследуемого устойчивого состояния. При таком подходе запас устойчивости, например, по одному из трех коэффициентов передачи мощностной обратной связи (МОС), а именно - положительному, оценен всего в 17-19% для четырех зарегистрированных режимов работы: 1,9 и 2 МВт (май 1993 г.), 1,9 МВт (декабрь 1993 г.) и 1,95 МВт (январь 1996 г.). Расход теплоносителя для всех режимов составлял 90 м³/ч. В одном же из зарегистрированных в январе 1997 г. процессов (при средней мощности 1,87 МВт и расходе теплоносителя 80 м³/ч) состояние реактора без АР оценено как неустойчивое [4].

Ниже дан анализ влияния параметров штатного АР на переходные процессы мощности при регулярных и случайных возмущениях реактивности.

2. Краткое описание модели ИБР-2

Переходные процессы вычислены с помощью созданной блочной модели реактора ИБР-2, использующей z-преобразования переменных [5]. Модель учитывает нелинейность коэффициентов передачи МОС. Блок-схема реактора ИБР-2 с АР приведена на рис. 1.

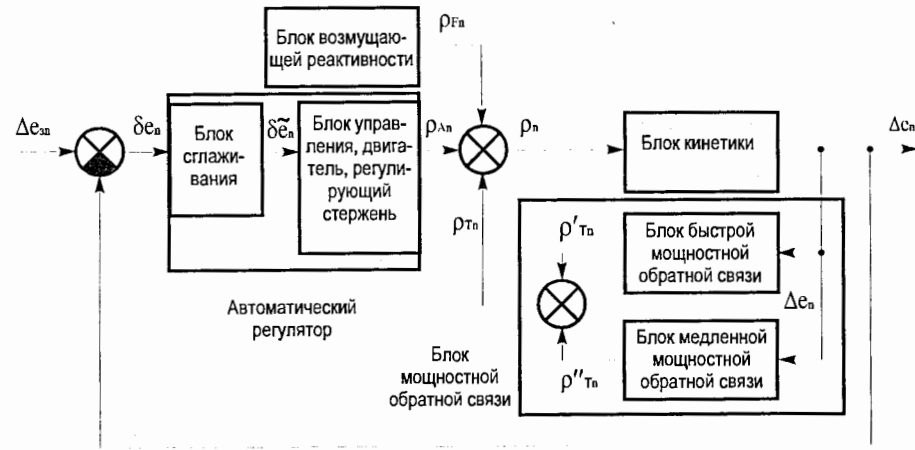


Рис. 1. Блок-схема реактора ИБР-2.

Параметры быстрой и медленной мощностной обратной связи определены экспериментально. Блок возмущающей реактивности позволял генерировать любую комбинацию детерминированных и случайных изменений реактивности. Для моделирования использовались скачки реактивности, а также случайный гауссовский

шум с наложенной на него серией гармонических колебаний. В последнем случае имитировался реальный спектр случайных возмущений реактивности, имеющий место при нормальной работе реактора.

Список использованных обозначений:

- E° - базовое значение энергии импульса мощности;
- n - индекс, указывающий, что переменные с данным индексом соответствуют n -му импульсу мощности;
- $\Delta e, \Delta e_3, \delta e = \Delta e_3 - \Delta e, \delta \bar{e}$ - соответственно отклонение энергии импульса мощности от базового значения (в долях от базового значения), ее задающее значение, их разность и сглаженная разность;
- $\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \delta e_n^2 \right)}$ - оценка среднеквадратического отклонения энергий импульсов мощности, полученных при моделировании переходных процессов ($N=250$);
- $\rho, \rho_A, \rho_F, \rho_T, \rho'_T, \rho''_T$ - соответственно реактивность реактора, АР, внешняя (возмущение), а также реактивность МОС (суммарная, быстрый и медленный МОС). Все реактивности выражены в импульсных долях запаздывающих нейтронов β_u ;
- T - период импульсов мощности;
- k_j, T_j, c_j - соответственно коэффициент передачи, постоянная времени и коэффициент нелинейности j -й составляющей МОС ($j=1, \dots, 5$);
- k - параметр усреднения блока сглаживания АР (может принимать одно из четырех значений: 4, 8, 16, 32);
- Δ - параметр скорости шагового двигателя АР (может принимать одно из четырех значений: 0,05; 0,10; 0,15; 0,20);
- $v_A = 5,5$ - скорость шагового двигателя АР (шаг/с), соответствующая значению $\delta \bar{e} = \Delta$;
- $m_A = 0,0136$ - масштаб одного шага АР (β_u /шаг).

3. Моделирование переходных процессов

Переходные процессы вычислены для двух наборов параметров МОС, соответствующих двум режимам работы реактора.

Режим 1 соответствует средней мощности реактора 1,7 МВт при расходе теплоносителя 90 м³/ч (май 1993 г.). МОС представлена быстрой МОС, состоящей из трех инерционных звеньев с нелинейными коэффициентами передачи. В целях

упрощения модели коэффициенты передачи МОС приняты зависимыми не от реактивности МОС, как в [3, 4], а от отклонения энергии импульса мощности [5].

Быстрая мощностная обратная связь описана уравнением

$$\rho'_{Tn} = \sum_{j=1}^3 (\rho_{Tjn-1} + E^{\circ} \Delta e_{n-1} k_j (1 + c_j \Delta e_{n-1}) / T_j) \exp(-T / T_j), \quad (1)$$

т.е. представлена тремя инерционными звеньями.

Режим 2 соответствует средней мощности 1,87 МВт при расходе теплоносителя 80 м³/ч. МОС представлена двумя инерционными звеньями быстрой МОС с нелинейными коэффициентами передачи (1) (влияние третьего звена не учитывалось, т.к. его постоянная времени оказалась много меньше периода импульсов мощности) и двумя инерционными звеньями медленной МОС с линейными коэффициентами передачи. Медленная МОС описана уравнениями

$$\rho''_{Tn} = \sum_{j=4}^5 (\rho_{Tjn-1} + E^{\circ} \Delta e_{n-1} k_j / T_j) \exp(-T / T_j), \quad (2)$$

при соблюдении условия

$$k_4 / T_4 = -k_5 / T_5, \quad (3)$$

означающего, что реактивность медленной МОС не изменяется скачком.

Реактивность АР описана уравнениями [2]

$$\begin{aligned} \tilde{\delta e}_n &= \tilde{\delta e}_{n-1} + (\delta e_n - \tilde{\delta e}_{n-1}) / k, \\ \rho_{An} &= \rho_{An-1} + (v_{\Delta} m_A / \Delta) T \tilde{\delta e}_{n-1}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $v_{\Delta} m_A = 0,0748 \beta_u / c$.

Анализ устойчивости реактора с включенным АР при параметрах реактора, соответствующих режиму 2, показал, что запас устойчивости реактора понижается с увеличением параметров АР k и Δ [2].

Для двух указанных режимов моделировались переходные процессы при различных вариантах возмущения реактивности:

вариант а - скачок реактивности $\rho_F = -0,1 \beta_u$,

вариант б - случайное возмущение реактивности с нормальным законом распределения с дисперсией $\sigma_{\rho}^2 = (5 \cdot 10^{-2})^2 \beta_u^2$,

вариант в - возмущение реактивности представляет собой сумму случайного возмущения согласно варианту "б" и одновременно четырех синусоидальных составляющих соответственно с амплитудами 0,03; 0,024; 0,009; 0,003 β_u , с частотами 0,8; 1,25; 1,6; 1,8 Гц и с фазами (выбранными произвольно) 0; 0,4; 0,8; 1,2 рад. Такое возмущение близко к реальному для ИБР-2.

Все процессы моделировались как без АР, так и при включенном АР с различными значениями параметров k и Δ . Помимо штатных значений k , равных 4, 8,

16 и 32, выбиралось также значение $k=1$, что соответствует отсутствию блока сглаживания.

Переходные процессы при скачкообразном изменении реактивности (вариант "а") для режима 1 показаны на рис. 2а (без АР) и на рис. 2 б, в, г (с АР), а для режима 2 - на рис. 3а (без АР) и на рис. 3 б, в, г, д (с АР).

При фиксированных значениях k , равных 1, 4, 8, длительность переходного процесса увеличивается с увеличением параметра Δ (рис. 2, 3), а при фиксированных значениях k , равных 16 и 32, - уменьшается с увеличением Δ .

Наименьшие колебания наблюдаются при $k=1$, т.е. при отсутствии блока сглаживания АР (рис. 2б и 3б). С увеличением k колебательность увеличивается (рис. 2 в, г, 3 в, г).

При k , равных 16 и 32, колебательность вычисленных переходных процессов еще более увеличивается. Для режима 2 при $k=32$ и $\Delta=0,05$ наблюдается автоколебательный процесс, при котором амплитуда колебаний с течением времени увеличивается, выходя на большой установившийся уровень (рис. 3д).

Таким образом, если учитывать лишь регулярные возмущения реактивности, то целесообразно придать параметрам АР значения $k=1$ и $\Delta=0,05$.

На рис. 4 показаны зависимости среднеквадратических отклонений энергии импульсов мощности σ , вычисленных за интервал времени 50 с (250 импульсов). Рис. 4а и 4б относятся к случайным возмущениям реактивности с дисперсией $\sigma_{\rho}^2 = 25 \cdot 10^{-4} \beta_u^2$ (возмущение реактивности согласно варианту "б") при различных значениях параметров АР k и Δ . Рис. 4а соответствует режиму 1, а рис. 4б - режиму 2.

Из рис. 4 видно, что при случайных возмущениях реактивности при $k=1$ как для режима 1, так и для режима 2 σ уменьшается с увеличением Δ . При увеличении параметра k до значения $k=4$ для режима 1 σ уменьшается (рис. 4а), а для режима 2 - практически не изменяется (рис. 4б). Из рис. 4а следует, что при $k=1$ при $\Delta=0,05$ $\sigma=0,0569$, а при $\Delta=0,20$ $\sigma=0,0526$, т.е. значения σ отличаются на 8%. При $k=4$ для $\Delta=0,05$ $\sigma=0,0539$, а для $\Delta=0,20$ $\sigma=0,0521$, т.е. σ отличаются на 4%.

Таким образом, если учитывать помимо регулярных возмущений и случайные возмущения реактивности, то и в этом случае вряд ли целесообразно выбирать значения k больше 1 (во всяком случае не следует выбирать $k>4$).

На рис. 4а показаны также зависимости σ для режима работы реактора 1 при случайном возмущении реактивности одновременно с четырьмя регулярными синусоидальными возмущениями (вариант возмущения реактивности "в"). Из рис. 4а видно, что для варианта возмущения реактивности "в" характер σ не изменился по сравнению с вариантом "б", но значения σ , естественно, увеличились.

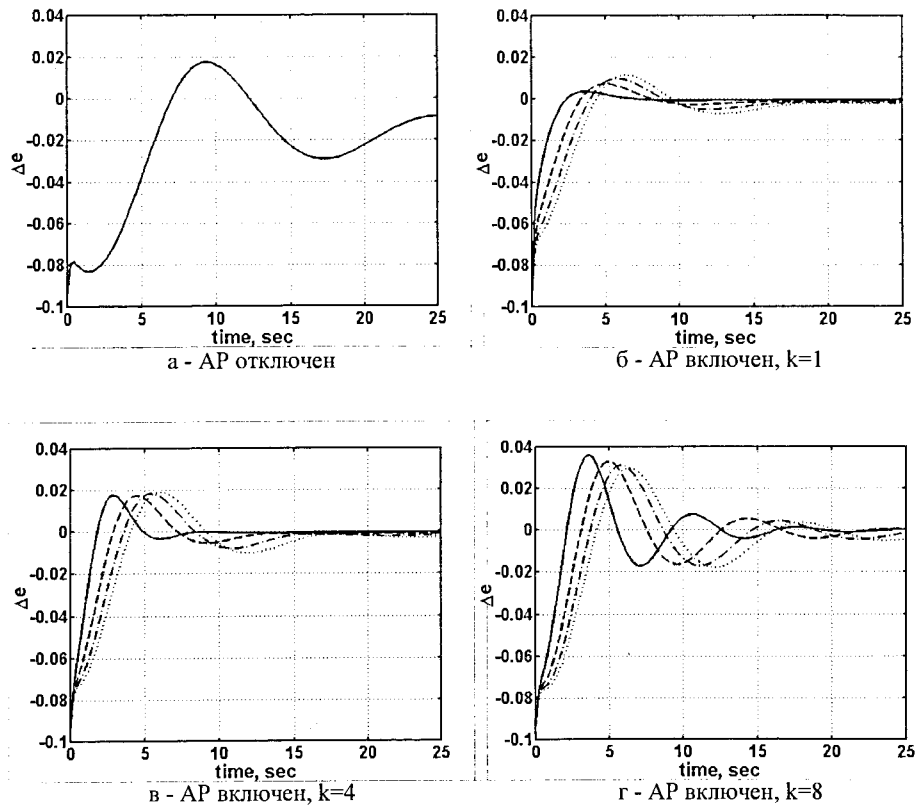


Рис. 2. Переходные процессы мощности ИБР-2 при скачке реактивности $-0,1\beta_0$, средняя мощность реактора 1,7 МВт, расход теплоносителя $90 \text{ м}^3/\text{ч}$.

— $\Delta=0,05$, ---- $\Delta=0,10$, -.- $\Delta=0,15$, $\Delta=0,20$

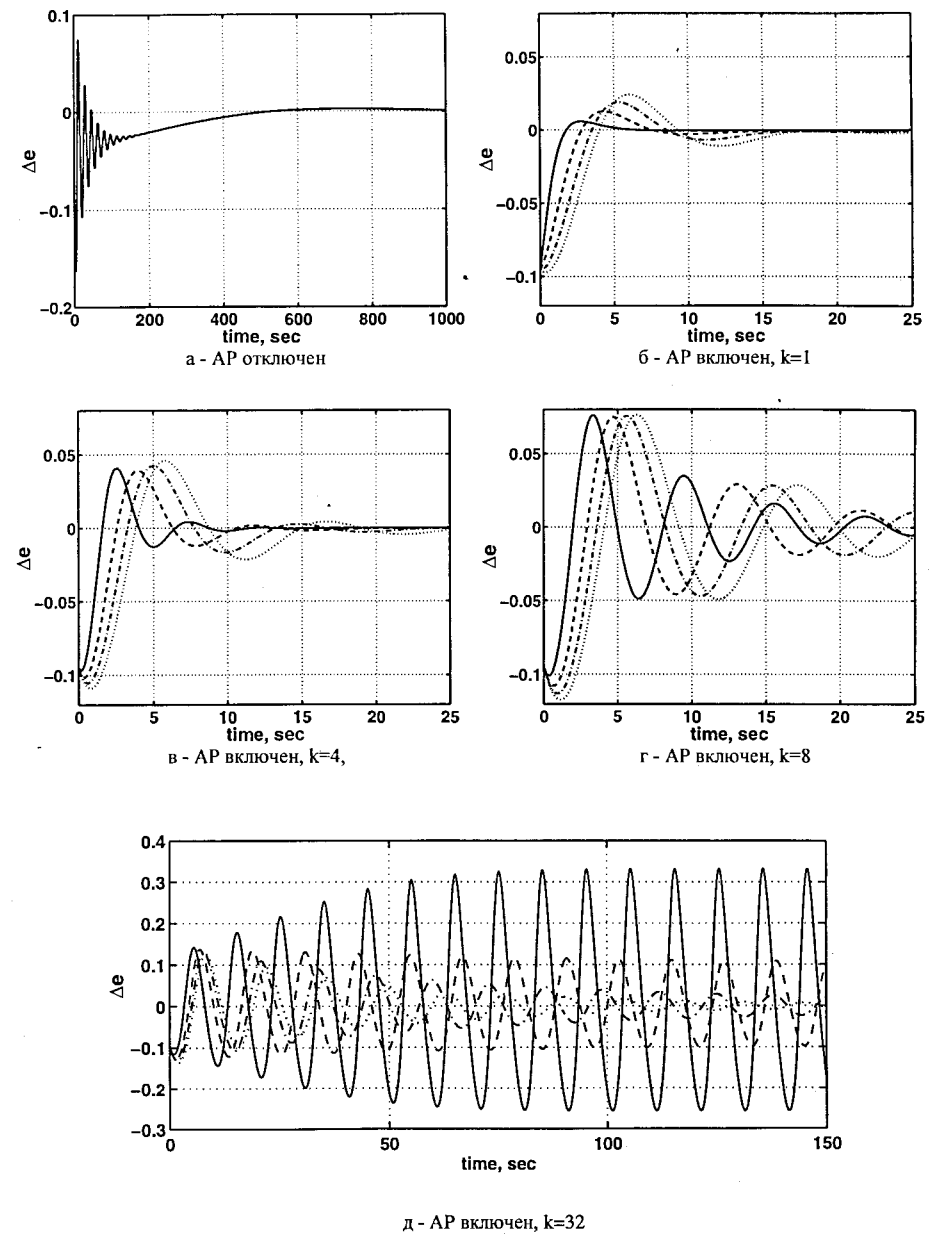


Рис. 3. Переходные процессы мощности ИБР-2 при скачке реактивности $-0,1\beta_0$, средняя мощность реактора 1,87 МВт, расход теплоносителя $80 \text{ м}^3/\text{ч}$.

— $\Delta=0,05$, ---- $\Delta=0,10$, -.- $\Delta=0,15$, $\Delta=0,20$

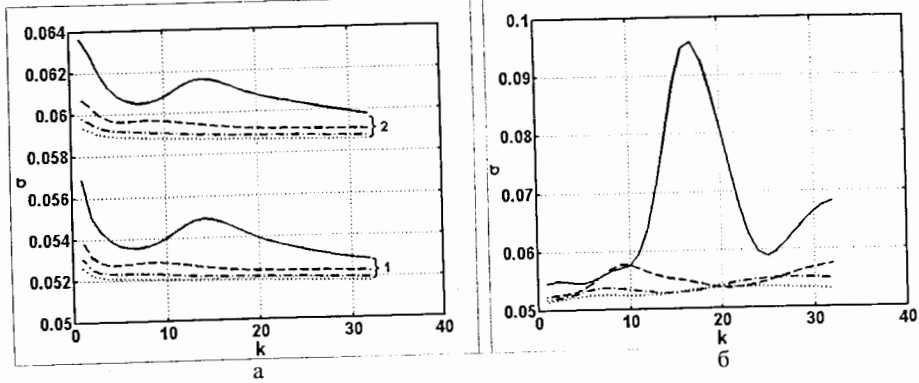


Рис. 4. Среднеквадратические отклонения энергии импульсов мощности σ в зависимости от параметров АР k и Δ .

а - средняя мощность реактора 1,7 МВт, расход теплоносителя 90 м³/ч. Кривые 1 соответствуют случайному возмущению реактивности с дисперсией $25 \cdot 10^{-4} \beta_u^2$. Кривые 2 соответствуют случайному возмущению реактивности с дисперсией $25 \cdot 10^{-4} \beta_u^2$ совместно с регулярным возмущением в виде суммы четырех синусоидальных составляющих с амплитудами 0,03; 0,024; 0,009; 0,003 β_u , с частотами 0,8; 1,25; 1,6; 1,8 Гц и фазами 0; 0,4; 0,8; 1,2 рад.

б - средняя мощность реактора 1,87 МВт, расход теплоносителя 80 м³/ч. Кривые соответствуют случайному возмущению реактивности с дисперсией $25 \cdot 10^{-4} \beta_u^2$.

— $\Delta=0,05$, - - - $\Delta=0,10$, - · - $\Delta=0,15$, $\Delta=0,20$

Для режима 1 при возмущении реактивности по варианту "в" при работе реактора без АР $\sigma=0,0581$, а при работе реактора с АР при $k=1$ и $\Delta=0,20$ $\sigma=0,0594$ (рис. 4а), т.е. при включенном АР σ увеличивается по сравнению с процессом без АР всего на 2%. Однако регулярные возмущения реактивности при таких параметрах АР будут отстраиваться без существенных перерегулирований. Иначе говоря, при параметрах АР $k=1$ (блок сглаживания устранен) и $\Delta=0,20$ наблюдаются удовлетворительные переходные процессы как при регулярных, так и при случайных возмущениях реактивности.

Для наглядности для различных значений параметров АР на рис. 5 представлены показатели качества переходных процессов при случайных и при скачкообразных возмущениях реактивности для реактора, параметры которого соответствуют режиму работы 1. Рис. 5, в частности, показывает, что для $k=1$ при уменьшении Δ с 0,20 до 0,05 σ увеличивается всего на 8%, перерегулирование же Δe_{\max} уменьшается в 3 раза.

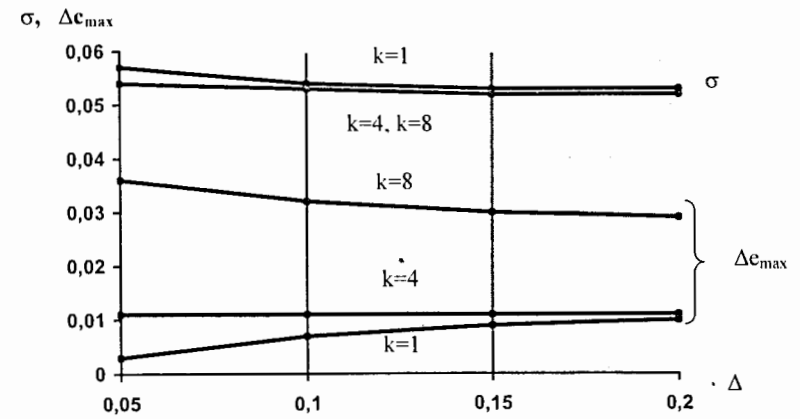


Рис. 5. Зависимость показателей качества переходных процессов от параметров АР k и Δ . Средняя мощность 1,7 МВт, расход теплоносителя 90 м³/ч, параметры мощности обратной связи $k_j=-6,03; 2,33; -0,391 \beta_u/\text{МВт}$, $T_j=9,27; 3,19; 0,24$ с. $c_j=0,89; 0,10; -1,4$.

σ - среднеквадратическое отклонение энергии импульсов мощности при случайном возмущении реактивности с дисперсией $25 \cdot 10^{-4} \beta_u^2$.

Δe_{\max} - наибольшее положительное отклонение энергии импульсов мощности (перерегулирование) при скачкообразном возмущении реактивности $-0,1 \beta_u$.

4. Заключение

1. Из анализа смоделированных переходных процессов при регулярных (скачкообразных) возмущениях реактивности следует, что наилучшие переходные процессы соответствуют следующим значениям параметров АР: $k=1$ (т.е. блок сглаживания отсутствует) и $\Delta=0,05$ (т.е. скорость двигателя АР выбрана наибольшей). Эти процессы характеризуются наименьшей длительностью и наименьшим перерегулированием.

2. Из анализа переходных процессов при случайных, а также одновременно при случайных и регулярных синусоидальных возмущениях реактивности, имеющих место при нормальной работе реактора, и с учетом влияния параметров АР на скачкообразные возмущения реактивности следует, что целесообразно выбрать $k=1$ и $\Delta \leq 0,20$.

3. Указанным выше параметрам соответствуют приемлемые переходные процессы при скачкообразных возмущениях реактивности и достаточно низкие

значения среднеквадратических отклонений мощности при случайных возмущениях реактивности. С этой точки зрения значения выбранных параметров можно считать оптимальными. Принятые в настоящее время на ИБР-2 параметры $AP_{k=8}$ и $\Delta=0,20$ нельзя считать полностью оптимальными для нормальной эксплуатации реактора.

Литература

1. Попов А.К. О статически оптимальном регулировании энергии импульсов быстрого реактора. Атомная энергия, 1971, т.31, вып.3, с.269.
2. Попов А.К. Анализ устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при включенном автоматическом регуляторе. Сообщение ОИЯИ Р13-98-275, Дубна, 1998.
3. Попов А.К. Анализ устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при девятипараметрической модели мощностной обратной связи. Сообщение ОИЯИ Р13-96-297., Дубна, 1996.
4. Попов А.К. Анализ длительного колебательного переходного процесса мощности импульсного реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-97-361, Дубна, 1997.
5. Бондарченко Е.А., Пепельшев Ю.Н., Попов А.К. Модель импульсного реактора периодического действия ИБР-2 для исследования переходных процессов. Препринт ОИЯИ Р13-99-127, Дубна, 1999.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 июля 1999 года.