

10906

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



С348a

П-58

19/12-77

3 - 10906

5104 / 2-77

А.К.Попов, А.Д.Рогов

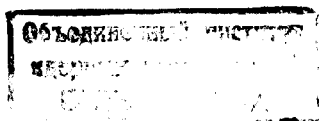
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА
НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ
(РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ)

1977

З - 10906

А.К.Попов, А.Д.Рогов

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА
НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ
(РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ)



Попов А.К., Рогов А.Д.

3- 10906

Переходные процессы импульсного реактора на быстрых нейтронах (результаты моделирования)

Приведены результаты моделирования переходных процессов импульсного реактора с параметрами ИБР-2 в режиме поддержания заданного уровня мощности при регулярных и случайных возмущениях реактивности, при изменении расхода теплоносителя и при переводе реактора на другой уровень мощности.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

© 1977 Объединенный институт ядерных исследований Дубна

Для исследования динамики импульсного реактора на быстрых нейтронах была создана программа моделирования на ЭВМ переходных процессов реактора^{1/}. С помощью этой программы моделировалось поведение реактора в режиме поддержания заданного уровня мощности при регулярных и случайных возмущениях реактивности, при изменении расхода теплоносителя и при изменении уставки мощности, т.е. при переводе реактора на другой уровень мощности. Изучалось влияние на переходные процессы параметров автоматического регулятора /АР/ и компенсирующего /или, иначе, промежуточного/ регулятора /КР/.

Изучался АР, у которого установившаяся скорость перемещения регулирующего стержня пропорциональна сигналу управления. При этом полагалось, что скорость перемещения стержня АР, а следовательно, и скорость изменения реактивности посредством АР ограничена некоторым пределом. Нелинейная зависимость реактивности АР ϵ_A от перемещения его стержня учитывалась аналитическим соотношением $\epsilon_A = 0,5\epsilon_{Am} \sin(\pi \ell_A)$, где ϵ_{Am} - эффективность АР, ℓ_A - перемещение стержня АР в долях от полного хода стержня ($-0,5 \leq \ell_A \leq 0,5$).

Сигнал управления Δ определялся относительной ошибкой регулирования $\Delta = \frac{E^* - E}{E^*}$, где E и E^* - соот-

ветственно измеренное и задающее значения энергии текущего импульса мощности. Рассматривался следующий закон формирования сигнала управления. В момент

времени $t = nT$ /где n - номер текущего импульса мощности, а T - период следования импульсов/ сигнал

управления равен $\bar{\Delta}_n = \bar{\Delta}_{n-1} + \frac{1}{\gamma} (\Delta_n - \bar{\Delta}_{n-1})$ и это значение

сохраняется до момента появления следующего импульса мощности. Здесь $\gamma \geq 1$ некоторый параметр. Выбором его значения достигается различная степень инерционности при формировании сигнала управления.

При $\gamma = 1$ в момент $t = nT$ значения сигнала управления и относительной ошибки регулирования равны: $\bar{\Delta}_n = \Delta_n$. При $\gamma > 1$ приращение сигнала управления $\bar{\Delta}_n - \bar{\Delta}_{n-1}$ уже не будет равно разности между текущим значением относительной ошибки регулирования и предыдущим значением сигнала управления, а будет составлять лишь часть

этой разности $\frac{1}{\gamma} (\Delta_n - \bar{\Delta}_{n-1})$. Чем больше γ , тем плавнее

изменение сигнала управления по сравнению с изменением относительной ошибки регулирования.

Изучалось влияние на переходные процессы параметра инерционности γ и коэффициента усиления АР. Под коэффициентом усиления АР k_A понимается отношение максимального значения установившейся скорости изменения реактивности АР к тому значению сигнала управления $\bar{\Delta}_m$, при котором эта скорость достигается:

$$k_A = \frac{(d\epsilon_A/dt)_m}{\bar{\Delta}_m}$$

При моделировании коэффициенту усиления АР придавалось три значения: 0,025; 0,25 и 2,5 β / с.* Наибольшему значению соответствует наибольшая скорость из-

менения реактивности $(\frac{d\epsilon_A}{dt})_m = 0,035 \beta$ / с.

Считалось, что включение и отключение КР осуществляется посредством реле. Отклонение стержня АР от среднего положения более чем на половину его максимального хода в ту или иную сторону вызывает включение

КР, в результате чего стержень КР движется в том же направлении, в котором до этого двигался стержень АР. Отключение КР зависит от коэффициента возврата реле. Под коэффициентом возврата понимается отношение величины смещения стержня АР /относительно среднего положения/, при которой происходит отключение КР, к величине смещения стержня АР, при которой происходит включение КР.

Рассматривались два значения коэффициента возврата реле: 1 и 0. При коэффициенте 1 отключение КР происходит тогда, когда отклонение стержня АР от среднего положения становится меньше половины его максимального хода. При коэффициенте 0 отключение КР происходит лишь тогда, когда стержень АР достигает среднего положения.

Зависимость реактивности от мощности реактора /обратная связь/ учитывалась путем введения зависимости расширения топлива и теплоносителя от их средних температур.

При моделировании переходных процессов полагалось, что до момента возмущения стержни АР и КР неподвижны и находятся в среднем положении, а вся система - в установившемся состоянии.

На рис. 1-8 показаны переходные процессы импульсного реактора с параметрами ИБР-2 в режиме стабилизации мощности при типовых возмущениях. Частота импульсов мощности принята наименьшей /5 Гц/, что соответствует наиболее напряженному режиму работы реактора.

На рис. 1 показано изменение относительной ошибки регулирования при скачкообразном увеличении реактивности системы на 0,02 β для k_A , равного 0,025 и 0,25 β / с. При номинальной мощности реактора введение дополнительной инерционности в сигнал управления /при $\gamma = 5$ / практически не оказывает влияния на переходный процесс. При мощности же, составляющей 10% от номинальной, введение инерционности существенно ухудшает переходный процесс. Лучшие переходные процессы соответствуют в меру медленному АР / $k_A = 0,025 \beta$ / с/

* β - суммарная доля запаздывающих нейтронов.

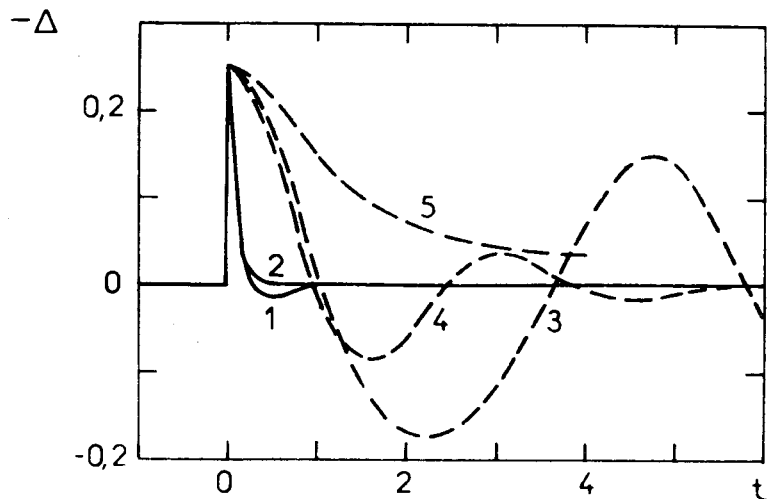


Рис. 1. Изменение относительной ошибки регулирования Δ /оглябающая/ при скачке реактивности $0,02 \beta$ в момент времени $t=0$. t - время в с. Сплошные линии относятся к режиму поддержания номинальной мощности, пунктирные - 10% от номинальной. 1 - $k_A = 0,25 \beta/c$, $\tau = 1$. 2 - $k_A = 0,025 \beta/c$, $\tau = 1$. 3 - $k_A = 0,25 \beta/c$, $\tau = 5$. 4 - $k_A = 0,25 \beta/c$, $\tau = 1$. 5 - $k_A = 0,025 \beta/c$, $\tau = 1$.

без введения дополнительной инерционности. При номинальной мощности переходные процессы для $k_A = 0,025 \beta/c$ и $k_A = 0,25 \beta/c$ практически совпадают. При 10-процентной мощности для $k_A = 0,025 \beta/c$ переходный процесс имеет аperiodический /а не колебательный, как при $k_A = 0,25 \beta/c$ / характер. При $k_A = 2,5 \beta/c$ в системе наблюдаются автоколебания.

Моделировались переходные процессы при случайном возмущении реактивности, изменяющейся в диапазоне $\pm 0,05 \beta$ с постоянной плотностью вероятности. Результаты моделирования сведены в таблицу. В ней указаны среднеквадратические значения относительной ошибки регулирования для режима саморегулирования, когда АР и КР отключены, и для режима автоматического регулирования. В этом последнем рассматривалось влияние различных значений коэффициента усиления АР k_A , а также влияние дополнительной инерционности, вводимой

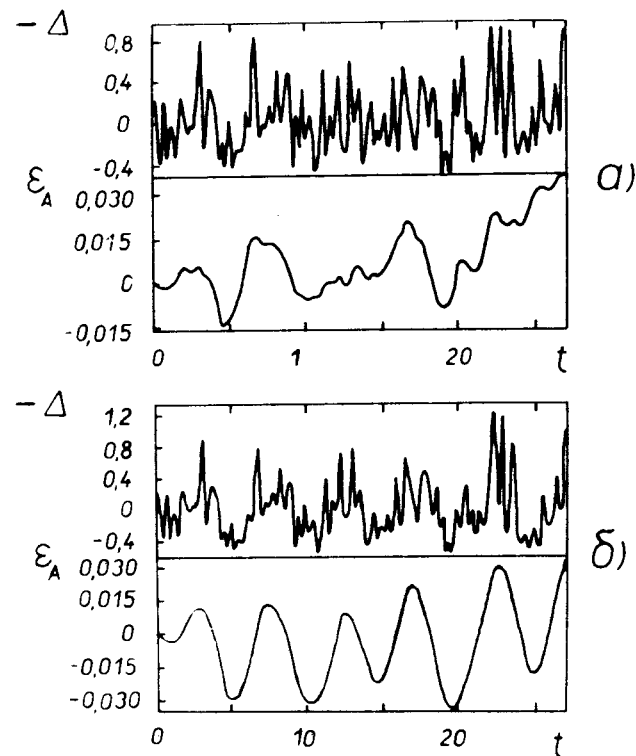


Рис. 2. Переходные процессы при случайном возмущении реактивности, изменяющейся в диапазоне $\pm 0,05 \beta$ с постоянной плотностью вероятности. Средняя мощность реактора составляет 10% от номинальной, коэффициент усиления АР $k_A = 0,25 \beta/c$, Δ - относительная ошибка регулирования, β - реактивность АР в долях β , t - время в с., а - дополнительная инерционность в канале управления отсутствует / $\tau = 1$ /, б - дополнительная инерционность введена / $\tau = 5$ /.

при формировании сигнала управления параметром $\tau = 1/\tau$ соответствует отсутствию дополнительной инерционности/.

Из таблицы видно, что с точки зрения реакции на случайные возмущения реактивности следует отдать предпочтение более медленному АР, так как при любом

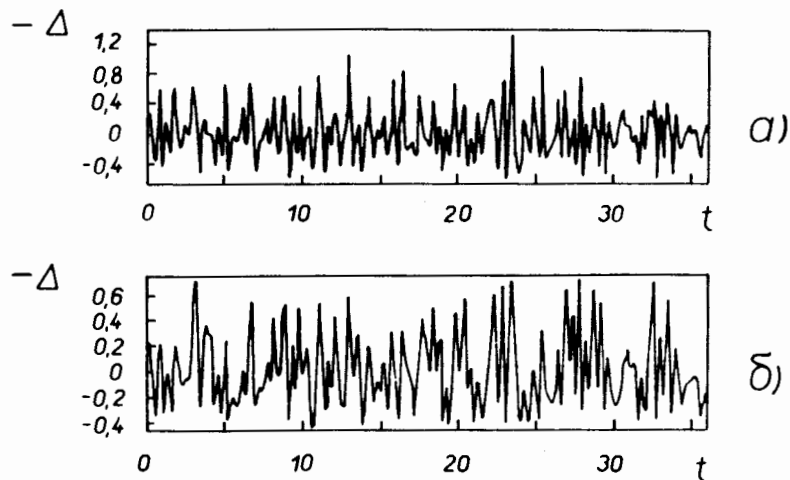


Рис. 3. Изменение относительной ошибки регулирования Δ в режиме саморегулирования при случайном возмущении реактивности, изменяющейся в диапазоне $\pm 0,05 \beta$ с постоянной плотностью вероятности. t - время в с., a - средняя номинальная мощность реактора. $б$ - средняя мощность реактора, составляет 10% от номинальной.

Таблица

Среднеквадратическое значение относительной ошибки регулирования Δ ср. кв.

Средняя мощность реактора в долях от номинальной	Δ ср. кв.				
	В режиме саморегулирования	В режиме автоматического регулирования			
		$\tau = 1$		$\tau = 5$	
		$K_A = 0,025$ β/c	$K_A = 0,25$ β/c	$K_A = 0,025$ β/c	$K_A = 0,25$ β/c
1	0,38	0,38	0,4	0,38	0,38
0,1	0,31	0,32	0,35	0,31	0,42
0,01	0,32	0,31	0,36	0,31	0,45

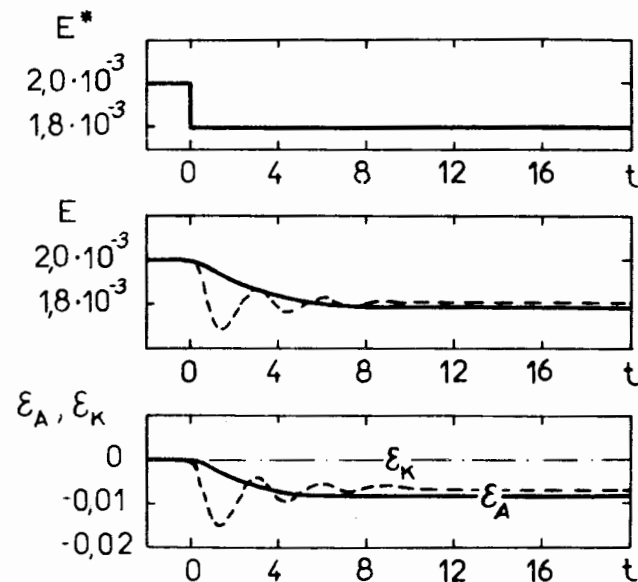


Рис. 4. Перевод реактора на пониженный уровень мощности /начальная мощность составляет 1% от номинальной/. E^* , E - соответственно задающее и текущее значения энергии импульса мощности /оглябающие/ в с; ϵ_A, ϵ_K - реактивность, обусловленная соответственно АР и КР в долях β ; t - время в с. — $k_A = 0,025 \beta/c$. - - - $k_A = 0,25 \beta/c$. /Энергия имеет размерность времени, поскольку мощность выражена в относительных единицах/.

уровне мощности увеличение коэффициента усиления АР приводит к увеличению среднеквадратической относительной ошибки регулирования. При медленном АР / $k_A = 0,025 \beta/c$ / введение дополнительной инерционности при формировании сигнала управления не оказывает какого-либо заметного влияния. При более быстром АР / $k_A = 0,25 \beta/c$ / и при мощности реактора, существенно меньшей номинальной, введение инерционности ухудшает работу системы.

На рис. 2а показаны переходные процессы, соответствующие работе реактора со средней мощностью, составляющей 10% от номинальной, при $k_A = 0,25 \beta/c$ и $\tau = 1$.

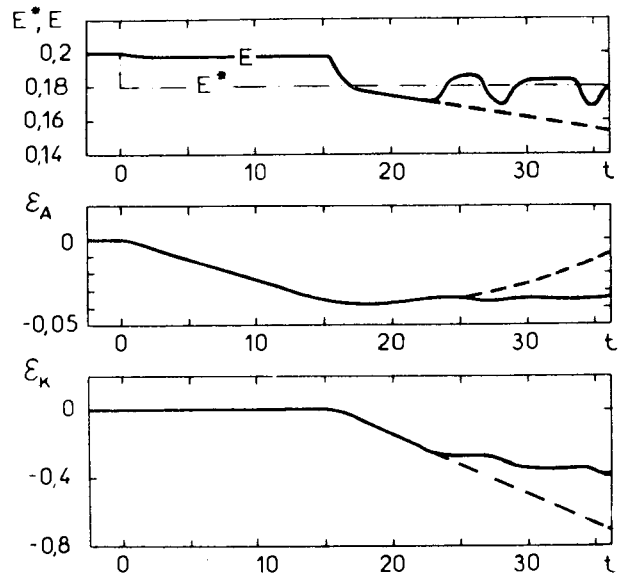


Рис. 5. Перевод реактора на пониженный уровень мощности /начальная мощность номинальная/. E^* , E - соответственно задающее и текущее значения энергии импульсов мощности /огibaющие/ в с; ϵ_A , ϵ_K - реактивность, обусловленная соответственно АР и КР в долях β ; t - время в с. $k_A = 0,025 \beta/\text{с}$; предельная скорость изменения реактивности посредством КР принята $0,035 \beta/\text{с}$. \dots - коэффициент возврата реле, включающего и отключающего КР, равный 1, \dots - коэффициент возврата реле, равный 0.

На рис. 2б показаны процессы при той же реализации случайного изменения реактивности и том же k_A , но при $\gamma = 5$.

При прочих равных условиях существенное проявление отрицательной температурной обратной связи реактора ведет к увеличению среднеквадратической относительной ошибки регулирования. На рис. 3 показаны изменения относительной ошибки регулирования в режиме саморегулирования при одинаковых /таких же, как в предыдущих случаях/ реализациях возмущающей реактивности. Рис. 3а соответствует номинальной мощности, а рис. 3б -

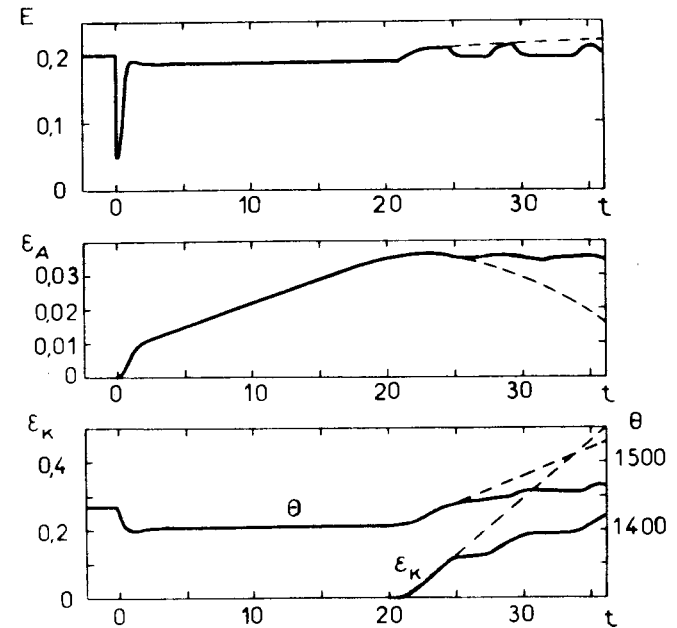


Рис. 6. Переходные процессы при уменьшении скачком расхода теплоносителя в два раза в момент времени $t = 0$. Сплошные линии соответствуют коэффициенту возврата реле 1, пунктирные - 0. E - энергия импульсов мощности /огibaющая/ в с; ϵ_A , ϵ_K - реактивность, обусловленная соответственно АР и КР в долях β ; θ - усредненная по объему активной зоны температура топлива в моменты окончания импульсов мощности /огibaющая/ в $^{\circ}\text{C}$; t - время в с. $k_A = 0,025 \beta/\text{с}$; предельная скорость изменения реактивности посредством КР принята $0,035 \beta/\text{с}$.

10% от номинала. Аналогичные процессы наблюдаются и при автоматическом регулировании с медленным АР / $k_A = 0,025 \beta/\text{с}$.

Моделировался перевод реактора на новый уровень мощности путем изменения скачком задающего значения энергии импульса E^* . На рис. 4 приведены переходные процессы, соответствующие понижению мощности реактора на 10% относительно ее прежнего уровня, составляющего

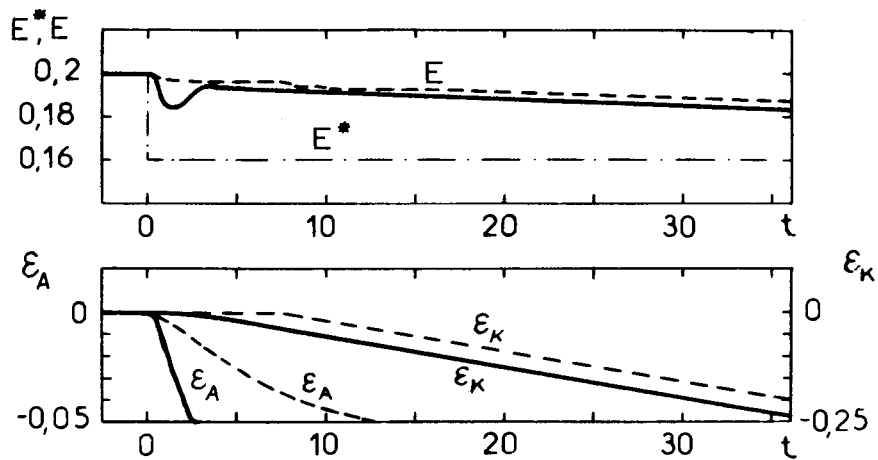


Рис. 7. Понижение мощности на 20% от номинального уровня. /Предельная скорость изменения реактивности посредством КР составляет 0,007 β/с/. E*, E - соответственно задающее и текущее значения энергии импульсов мощности /огibaющие/ в с; ε_A, ε_K - реактивность, обусловленная соответственно АР и КР в долях β; t - время в с. — k_A = 0,25 β/с. - - - - k_A = 0,025 β/с.

1% от номинального значения. При k_A = 0,025 β/с наблюдается плавный переход на новый уровень мощности. При k_A = 0,25 β/с переходный процесс носит колебательный характер.

На рис. 5 показаны переходные процессы, соответствующие понижению мощности реактора на 10% от номинального уровня при двух значениях коэффициента возврата реле, включающего и отключающего КР: 1 и 0. Приведенные переходные процессы относятся к случаю, когда установившаяся скорость изменения реактивности посредством КР принята равной 0,035 долей β в секунду, а коэффициент усиления АР k_A = 0,025 β/с.

Рис. 6 отражает влияние коэффициента возврата реле /1 и 0/ на переходные процессы реактора, работающего на номинальной мощности, при уменьшении скачком в два раза расхода теплоносителя через активную зону

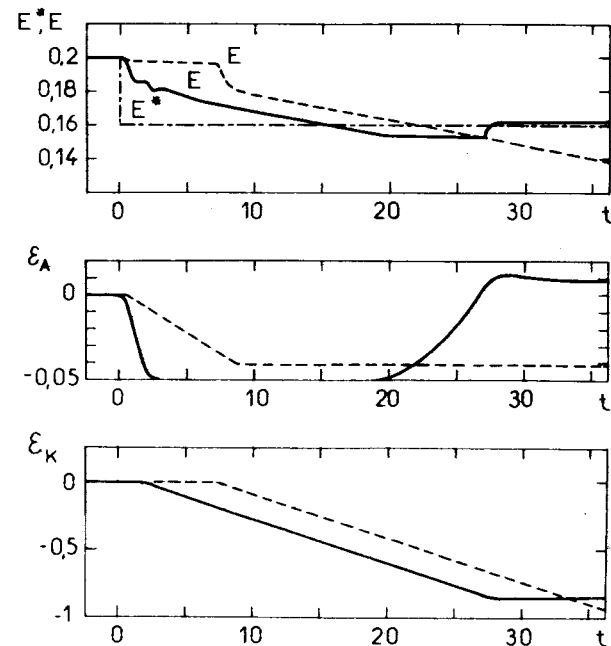


Рис. 8. Понижение мощности на 20% от номинального уровня. /Предельная скорость изменения реактивности посредством КР составляет 0,035 β/с/. E*, E - соответственно задающее и текущее значения энергии импульсов мощности /огibaющие/ в с; ε_A, ε_K - реактивность, обусловленная соответственно АР и КР в долях β; t - время в с. — k_A = 0,25 β/с, коэффициент возврата реле, включающего и отключающего КР, равен нулю; - - - - k_A = 0,035 β/с.

вследствие отключения одной из двух петель контура теплоносителя. Как и в предыдущем случае, принято k_A = 0,025 β/с, а установившаяся скорость изменения реактивности посредством КР - 0,035 β/с.

Из рис. 5 и 6 видно, что нулевое значение коэффициента возврата реле, обеспечивая возвращение АР в среднее положение, способствует продолжительному безостановочному движению стержня КР /что нежелательно по соображениям безопасности/, и, следовательно, более длительному перерегулированию.

Изменение уставки уровня мощности на 20% /рис. 7 и 8/ приводит к существенно худшим переходным процессам, чем изменение на 10% /рис. 5/. Установившаяся скорость изменения реактивности посредством КР принята 0,007 β/с /рис. 7/ и 0,035 β/с /рис. 8/. Рис. 7 и 8 отражают также влияние коэффициента усиления АР / $k_A=0,025$ и $k_A=0,25$ β/с/ на переходные процессы. Зона нечувствительности усилителя АР по входному сигналу принята равной 10% от того уровня сигнала, при котором установившаяся скорость АР достигает максимального значения. Вариант с более быстрыми АР и КР /сплошные линии на рис. 8/ относится к случаю, когда коэффициент возврата реле, включающего и отключающего КР, равен нулю.

Изменение мощности на 20% требует компенсации органами регулирования достаточно большой реактивности, обусловленной температурной обратной связью. В этом режиме АР продолжительное время находится в крайнем положении, не участвуя в процессе регулирования. В результате этого система продолжительное время работает не как замкнутая, а как разомкнутая, что нежелательно, особенно в режиме повышения мощности реактора, при котором стержень КР продолжительное время движется в сторону увеличения реактивности реактора.

Моделирование показало, что в рассматриваемых типовых режимах наличие в контуре АР зоны нечувствительности, составляющей 10% от ширины линейного диапазона усилителя АР по сигналу управления, не оказывает существенного влияния на переходные процессы.

ВЫВОДЫ

1. Для получения приемлемых переходных процессов при регулярных и случайных возмущениях реактивности автоматический регулятор с общепринятой структурой /т.е. АР, у которого установившаяся скорость перемещения стержня АР пропорциональна ошибке регулирования/ должен обладать достаточно малым коэффициентом усиления. Введение дополнительной инерционности при

формировании сигнала управления с целью уменьшения отрицательного влияния флюктуаций реактивности на работу системы регулирования, как это предусмотрено в проекте ИБР-2, напротив, ухудшает переходные процессы.

2. Для перевода реактора на другой уровень мощности разовое изменение уставки задающего уровня мощности не должно быть значительным, а коэффициент возврата реле, включающего и отключающего КР, должен быть близким 1. В противном случае в течение продолжительного времени система работает как разомкнутая с неподвижным стержнем АР, находящимся в крайнем положении, идвигающимся в то же время стержнем КР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов А.К., Rogov A.Д. Программа для моделирования на ЭВМ динамики импульсного реактора. ОИЯИ, Б1-11-10120, Дубна, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 августа 1977 года.