

P13-2007-152

Ю. Н. Пепельшев, А. К. Попов

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
РЕГУЛЯТОРА ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА **ИБР-2**

Направлено в журнал «Атомная энергия»

Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.

P13-2007-152

Модельное исследование автоматического регулятора импульсного реактора ИБР-2

Для вычисления переходных процессов мощности в реакторе ИБР-2 создана специальная математическая модель динамики, учитывающая скачкообразное изменение реактивности автоматическим регулятором с шаговым электродвигателем. В модели учтены нелинейная зависимость энергии импульса мощности от реактивности и влияние разогрева реактора на реактивность посредством введения нелинейной обратной связи «энергия импульса мощности – реактивность». На основе модели вычислены переходные процессы относительного отклонения энергии импульсов мощности при различных возмущениях реактивности (случайном, смешанном и регулярном) при средней мощности реактора 1,475 МВт. Показано, что для улучшения качества процессов целесообразен выбор тех штатных значений параметров автоматического регулятора, при которых обеспечивается наименьший эффект сглаживания поступающего на автоматический регулятор сигнала и наименьшая скорость автоматического регулятора, а также уменьшение эффективности одного шага автоматического регулятора и введение 5 %-й зоны нечувствительности.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Pepelyshev Yu. N., Popov A. K.

P13-2007-152

Model Study of an Automatic Controller of the IBR-2 Pulsed Reactor

For calculation of power transients in the IBR-2 reactor a special mathematical model of dynamics taking into account the discontinuous jump of reactivity by an automatic controller with the step motor is created. In the model the nonlinear dependence of the energy of power pulse on the reactivity and the influence of warming up of the reactor on the reactivity by means of introduction of a nonlinear feedback «power-pulse energy – reactivity» are taken into account. With the help of the model the transients of relative deviation of power-pulse energy are calculated at various (random, mixed and regular) reactivity disturbances at the reactor mean power 1.475 MW. It is shown that to improve the quality of processes the choice of such regular values of parameters of the automatic controller is expedient, at which the least effect of smoothing of a signal acting on an automatic controller and the least speed of an automatic controller are provided, and the reduction of efficiency of one step of the automatic controller and introduction of a five-percent dead space are also expedient.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

Перемещение автоматического регулятора импульсного реактора ИБР-2 осуществляется шаговым электродвигателем, вследствие чего регулятор изменяет реактивность скачками. Для вычисления переходных процессов мощности в реакторе с учетом этой особенности регулятора создана специальная математическая модель динамики ИБР-2 (в предыдущей модели [1–3] эта особенность не учитывалась). В этой модели, как и в предыдущей, учтены нелинейная зависимость энергии импульса мощности от реактивности и влияние разогрева реактора на реактивность посредством введения нелинейной обратной связи «энергия импульса мощности – реактивность».

В качестве регулируемого параметра реактора принята относительная амплитуда импульса мощности  $p = P_m/P_m^0$ , где  $P_m, P_m^0$  — амплитуда импульса мощности и ее базовое значение соответственно. Из-за высокой точности поддержания скорости подвижного отражателя, формирующего импульсы мощности, относительная амплитуда импульса мощности  $p$  практически равна относительной энергии импульса мощности  $e$ :  $p = e = E/E^0$ , где  $E^0$  есть базовое значение энергии импульса  $E$ .

Сигнал управления двигателем регулятора формировался в такой последовательности. Регистрировалась амплитуда  $P_m$  каждого импульса мощности, и формировалось ее относительное значение  $p$ . Последовательность относительных амплитуд  $p$  поступала на вход блока сглаживания, на выходе которого создавался непрерывный сигнал  $\tilde{p}$  ступенчатой формы. Высота ступени  $\tilde{p}_n$  в интервале времени между импульсами с номерами  $n$  и  $n + 1$  формировалась по закону  $\tilde{p}_n = \tilde{p}_{n-1} + (p_n - \tilde{p}_{n-1})/q$ , где  $q$  — коэффициент сглаживания, которому можно было придавать одно из четырех значений: 4, 8, 16 и 32 (штатные значения).

Как следует из закона формирования сигнала  $\tilde{p}$ , значению  $q = 1$  соответствует отсутствие сглаживания сигнала  $p$ . Блок сглаживания, функционирующий по такому закону, представляет собой аperiodическое (инерционное) звено с входным сигналом  $p$  и выходным  $\tilde{p}$  [4]. Его постоянная времени и коэффициент передачи равны соответственно

$$\tilde{T} = \frac{T_{и}}{\ln [q/(q - 1)]}, \quad \tilde{k} = \frac{\tilde{T}}{q} = \tilde{T} \left[ 1 - \exp \left( -T_{и}/\tilde{T} \right) \right] = \frac{T_{и}}{q \ln [q/(q - 1)]}.$$

Из выходного сигнала блока сглаживания формировался непрерывный ступенчатый сигнал отклонения  $\Delta\tilde{p}_n = 1 - \tilde{p}_n$ , представляющий собой разность

между желаемым (единичным) и текущим значением относительной амплитуды импульса мощности. Из сигнала  $\Delta \hat{p}_n$  формировался сигнал его знака и сигнал его модуля. Сигнал знака определял направление движения шагового двигателя. Сигнал, пропорциональный сигналу модуля, определял момент перемещения двигателя на один шаг. Коэффициент пропорциональности определялся значением параметра  $\Delta$ . При работе реактора был предусмотрен выбор одного из четырех значений  $\Delta$  в диапазоне от 0,05 до 0,20. Наименьшему значению  $\Delta = \Delta_{\min} = 0,05$  соответствовало перемещение двигателя со скоростью 5,5 шагов в секунду. При этом интервал времени между соседними шагами составлял 0,182 с. При иных значениях  $\Delta$  интервал между соседними шагами двигателя увеличивался в  $\Delta/\Delta_{\min}$  раз.

Таким образом, чем больше выбранное значение  $\Delta$ , тем меньше скорость двигателя, соответствующая одному и тому же значению модуля отклонения. Указанный закон перемещения автоматического регулятора дополнен двумя ограничениями: перемещение разрешалось, если в момент появления команды на перемещение сигнал модуля отклонения не выходил за границы заранее выбранной зоны. Если сигнал модуля был меньше 0,05 (5 %) или больше 0,20 (20 %), то перемещения двигателя не происходило.

При работе автоматического регулятора в средней зоне перемещение двигателя на один шаг приводило к изменению реактивности на величину  $0,0146\beta_n$ . Параметр  $\beta_n$  введен в работе [5] и назван импульсной долей запаздывающих нейтронов (для ИБР-2  $\beta_n = 1,6 \cdot 10^{-4}$ ). При небольших изменениях мощности реактивность импульсного реактора удобно выражать в долях  $\beta_n$  (по аналогии со стационарными реакторами, для которых реактивность при малых изменениях мощности выражают в долях запаздывающих нейтронов  $\beta$ ). Так, например, изменению реактивности на величину  $0,1\beta_n$  соответствует изменение амплитуды (и, следовательно, энергии) импульса мощности на величину 0,1 (т.е. на 10 %). Оценка эффективности одного шага перемещения автоматического регулятора ( $0,0146\beta_n$ ) получена в результате математической обработки переходного процесса мощности реактора, обусловленного симметричными прямоугольными колебаниями задающей (внешней) реактивности с низкой частотой. Эти колебания реактивности создавались автоматическим регулятором, который был выведен из контура регулирования и использовался для возмущения реактивности.

В 2002 г. при средней мощности реактора 1,47 МВт было зарегистрировано 70 периодов колебаний отклонения (от базового значения) энергии импульсов мощности. На рис. 1 показан период усредненных колебаний, полученный наложением друг на друга 70 зарегистрированных периодов. Период колебаний составил 125 с, что соответствовало 600 импульсам мощности за период. При такой низкой частоте колебаний реактивности в конце каждого полупериода мощность реактора выходила практически на установившийся уровень.

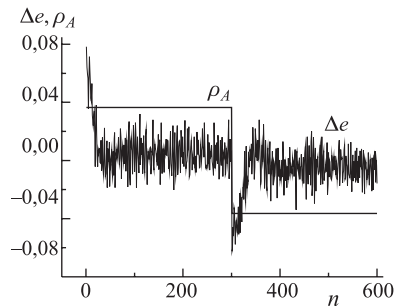


Рис. 1. Относительное отклонение энергии импульсов мощности  $\Delta e = p - 1$  при прямоугольных колебаниях внешней реактивности  $\rho_A$  ( $n$  — номер импульса мощности)

На основе динамической модели реактора ИБР-2 вычислены переходные процессы относительного отклонения энергии импульсов мощности при различных возмущениях реактивности (случайном, смешанном и регулярном) при средней мощности реактора 1,475 МВт. В качестве случайного возмущения использован шум реактивности, вычисленный из зарегистрированной в 2002 г. длительной последовательности амплитуд импульсов мощности при работе реактора в режиме саморегулирования, т. е. с отключенным автоматическим регулятором, при средней мощности 1,435 МВт. В качестве смешанного возмущения использовано суммарное воздействие этого шума и синусоидального возмущения с частотой 0,033 Гц и амплитудой, равной  $0,1\beta_{и}$ . Это дополнительное синусоидальное возмущение введено в связи с тем, что при средней мощности реактора 1,25–1,3 МВт были зарегистрированы существенные колебания мощности с этой частотой [3]. В качестве регулярного возмущения использован скачок реактивности, равный  $-0,15\beta_{и}$ .

Дополнительно вычислены переходные процессы для случая, когда в канале автоматического регулятора отсутствовала зона нечувствительности.

Анализ переходных процессов мощности, вычисленных при наличии случайных возмущений реактивности, показал следующее.

1. Сглаживание сигнала, поступавшего на вход автоматического регулятора, способствовало некоторому уменьшению среднеквадратического отклонения энергии импульсов мощности (по сравнению со случаем, когда какое-либо сглаживание отсутствовало).

2. Ослабление эффекта сглаживания путем уменьшения параметра сглаживания  $q$  с 8 до 4, как и увеличение скорости автоматического регулятора путем уменьшения параметра скорости  $\Delta$  автоматического регулятора с 0,4 до 0,05, не привело к заметному изменению среднеквадратического отклонения (наблюдалась лишь слабая тенденция к уменьшению).

3. Введение в канал автоматического регулятора 5 %-й зоны нечувствительности не привело к существенному изменению среднеквадратического отклонения.

В качестве иллюстрации приведена таблица, соответствующая смешанному возмущению реактивности в виде суммы случайной и синусоидальной составляющих.

**Среднеквадратическое отклонение энергии импульсов мощности  $\sigma$ , обусловленное возмущающей реактивностью в виде шума с наложенной на него синусоидальной составляющей, при различных значениях параметров автоматического регулятора с шаговым двигателем**

$q$	$\Delta$				Эффективность одного шага автоматического регулятора
	0,05	0,10	0,20	0,40	
	$\sigma$ При зоне нечувствительности, равной 0/0,05				
1	0,088/0,088	0,081/0,081	0,079/0,078	0,080/0,080	0,0146 $\beta_n$
4	0,075/0,076	0,075/0,077	0,077/0,078	0,077/0,078	
8	0,076/0,078	0,077/0,079	0,077/0,079	0,078/0,079	
1	0,081/0,081	0,079/0,079	0,078/0,079	0,079/0,079	0,0073 $\beta_n$
4	0,075/0,077	0,076/0,078	0,077/0,078	0,078/0,079	
8	0,076/0,079	0,077/0,079	0,078/0,079	0,078/0,079	

Анализ переходных процессов, вызванных скачком реактивности, показал, что улучшению качества переходных процессов (а именно уменьшению колебательности) способствовало следующее: 1) уменьшение параметра сглаживания  $q$ ; 2) увеличение параметра скорости  $\Delta$ , т.е. уменьшение скорости автоматического регулятора; 3) уменьшение эффективности одного шага автоматического регулятора (по сравнению со штатной), т.е. уменьшение реактивности, вносимой автоматическим регулятором при перемещении двигателя на один шаг (моделировалось уменьшение эффективности в два раза — с 0,0146 до 0,0073 $\beta_n$ /шаг); 4) введение в автоматический регулятор 5 %-й зоны нечувствительности.

Из анализа рассмотренных переходных процессов следует, что для улучшения качества процессов целесообразно установить наименьшее штатное значение параметра сглаживания ( $q = 4$ ) и наибольшее штатное значение параметра скорости ( $\Delta = 0,2$ ), уменьшить эффективность одного шага автоматического регулятора и ввести 5 %-ю зону нечувствительности. На рис. 2 и 3 показаны переходные процессы, соответствующие коэффициенту сглаживания  $q = 4$ .

Проведено моделирование переходных процессов, вызванных теми же возмущениями реактивности, для случая автоматического регулятора с двигателем непрерывного действия (при отсутствии сглаживания сигнала, поступавшего на вход автоматического регулятора). Результаты моделирования

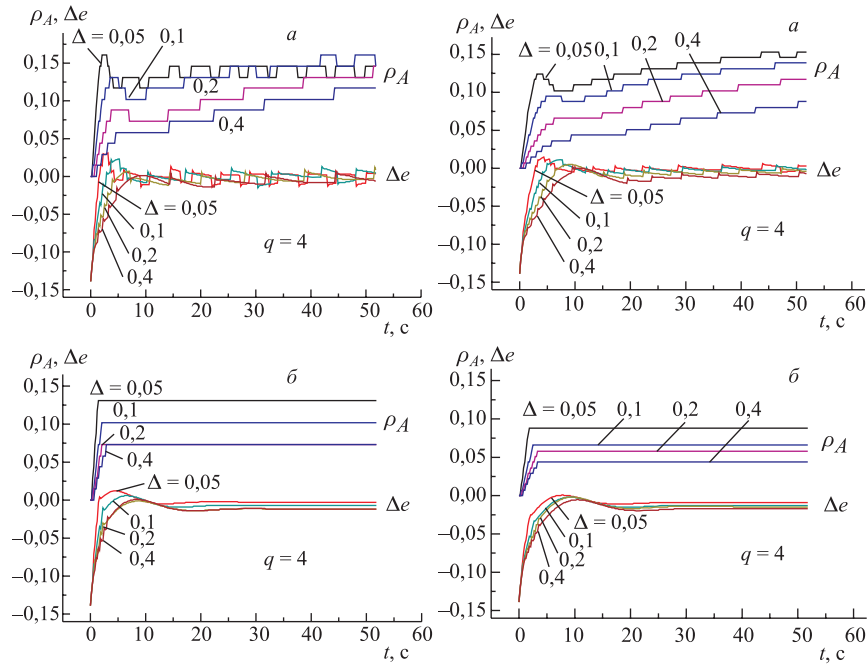


Рис. 2. Относительное отклонение энергии импульсов мощности  $\Delta e$  и реактивность, вносимая автоматическим регулятором  $\rho_A$ , в долях  $\beta_n$ , при скачке реактивности, равном  $-0,15\beta_n$  (эффективность одного шага автоматического регулятора  $0,0146\beta_n$ ): а) зона нечувствительности отсутствует; б) зона нечувствительности равна  $0,05$

Рис. 3. То же, что и на рис.2, но при меньшей эффективности одного шага автоматического регулятора ( $0,0073\beta_n$ )

ния показали, что переходные процессы, соответствующие автоматическому регулятору с шаговым двигателем (при уменьшенной в два раза эффективности одного шага относительно штатной) и с двигателем непрерывного действия, практически не отличаются.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Popov A. K., Peryolyshev Yu. N., Bondarchenko E. A.* The model of the IBR-2 pulsed reactor of periodic operation for investigations of transitional processes // *Ann. Nucl. Energy*. 2000. V. 27. P. 563–574.
2. *Popov A. K., Peryolyshev Yu. N., Bondarchenko E. A.* The model of the IBR-2 pulsed reactor dynamics and investigation of pulse energy stabilization // *Nucl. Techn.* 2002. V. 139, No. 1. P. 21–29.
3. *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.
4. *Попов А. К.* Анализ устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при включенном автоматическом регуляторе. Сообщение ОИЯИ Р13-98-275. Дубна, 1998.
5. *Бондаренко И. И., Ставиский Ю. Я.* Импульсный режим работы быстрого реактора // *АЭ*. 1959. Т. 7, вып. 5. С. 417–420.

Получено 18 октября 2007 г.



Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 20.11.2007.

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

Усл. печ. л. 0,56. Уч.-изд. л. 0,68. Тираж 305 экз. Заказ № 55968.

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/)