

P13-2007-150

Ли Ен Чхан, Ю. Н. Пепельшев

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ МОЩНОСТНОЙ  
ОБРАТНОЙ СВЯЗИ РЕАКТОРА ИБР-2  
С УЧЕТОМ МЕДЛЕННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Направлено в журнал «Атомная энергия»

Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю. Н.

P13-2007-150

Модель динамики мощностной обратной связи реактора ИБР-2 с учетом медленных составляющих

Составлена динамическая модель полной обратной связи и исследована методика определения параметров динамики медленных компонентов мощностной обратной связи. С использованием квазистационарного уравнения баланса реактивности выделен общий эффект мощностной обратной связи, представляющий собой сумму быстрого и медленного компонентов изменения реактивности. Форма кривых этого эффекта указывает на то, что модель динамики мощностной обратной связи ИБР-2 состоит из трех компонентов: пропорционального звена и двух медленных инерционных звеньев (сравнительно быстрого звена с положительным коэффициентом передачи и постоянной времени в несколько часов и более медленного звена с отрицательным коэффициентом передачи и постоянной времени до нескольких десятков часов). Определены параметры динамики медленного действия. Полученные по модели кривые изменения реактивности достаточно хорошо совпадают с экспериментальными.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Li Yong Chan, Pelyolyshev Yu. N.

P13-2007-150

The Dynamical Model of Power Feedback in the IBR-2 Pulsed Reactor Taking into Account Slow Components

The dynamical model of full-range feedback has been proposed and the method to determine the dynamical parameters of slow components in power feedback for individual operation cycles of the IBR-2 pulsed reactor has been studied. Using the quasistationary equation of reactivity balance, the total effect of power feedback which is the sum of fast and slow components of reactivity change has been calculated. The shape of curves of this effect shows that the dynamical model of power feedback in the IBR-2 pulsed reactor consists of three components: a proportional block and two inertial blocks of slow action (faster block with positive transfer coefficient and time constant of several hours, and slower block with negative transfer coefficient and time constant of several tens of hours). The parameters of slow dynamical process have also been determined. Curves of reactivity change obtained from the model are in good agreement with the ones from the experiments.

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

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

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение мощностной обратной связи в импульсном реакторе ИБР-2 в основном было связано с исследованием быстрых эффектов, действующих на достаточно малых интервалах времени (менее нескольких минут). Эти эффекты отражают тепловые, гидродинамические и механические процессы, происходящие внутри активной зоны. Было показано, что быструю обратную связь можно представить в виде суммы трех инерционных звеньев с нелинейными элементами (постоянные времени короче 10 с) [1] или в виде пяти инерционных звеньев, два из которых имеют более медленные постоянные времени порядка 5–15 мин [2, 3].

Кроме внутриреакторных быстрых процессов, существенное влияние на реактивность и, соответственно, на эксплуатационные характеристики реактора оказывают и медленные процессы, обусловленные изменением состояния конструктивных элементов из ближайшего окружения активной зоны, например, стационарных отражателей, тепловой и биологической защиты, а также параметров, задаваемых извне активной зоны, таких как температура натрия на входе активной зоны, расход натрия и положение органов регулирования. Кроме того, в качестве медленного процесса для ИБР-2 можно рассматривать и процесс выгорания топлива. Мощностной эффект реактивности, постоянные времени которого больше часа и которые действуют в течение одного или нескольких реакторных циклов, принято считать медленной мощностной обратной связью. Циклом работы реактора ИБР-2 считается повторяющийся двухнедельный период работы на мощности с последующим двухнедельным перерывом.

В работе путем исследования баланса реактивности в каждом реакторном цикле выделен полный мощностной эффект реактивности как сумма быстрого и медленного эффектов обратной связи. На основе выделенного полного эффекта реактивности построена универсальная модель динамики реактора ИБР-2 и определены параметры модели. В качестве иллюстрации методики построения модели использовались данные, полученные в нескольких последних циклах работы реактора перед его остановкой конце в 2006 г.

## 1. БАЛАНС РЕАКТИВНОСТИ В ОТДЕЛЬНОМ РЕАКТОРНОМ ЦИКЛЕ С УЧЕТОМ ПОЛНОГО МОЩНОСТНОГО ЭФФЕКТА

При исследовании процессов изменения реактивности длительностью несколько суток компоненты быстрой мощностной обратной связи с константами менее нескольких минут можно рассматривать как безынерционные звенья. В этом предположении с достаточно высокой точностью можно применить квазистационарное уравнение баланса реактивности. Сумма всех эффектов реактивности равна нулю, если на реакторе используется идеально работающая, т. е. полностью компенсирующая эти эффекты, система автоматического регулирования. Отсюда вводится уравнение баланса реактивности, которое для состояния импульсной критичности имеет вид [4]

$$\rho_{СУЗ} + \rho_T + \rho_G + \rho_\beta + \rho_x = 0, \quad (1)$$

где  $\rho_{СУЗ} = \sum_{i=1}^4 [k_i(z_i) - k_i(z_{0i})]$  — эффект перемещений органов регулирования;  $k_i(z)$  — кривая эффективности  $i$ -го блока системы управления и защиты;  $\rho_T = k_T(T_{ВХ} - T_{ВХ0})$  — температурный эффект реактивности натрия на входе активной зоны (изотермический эффект реактивности);  $T_{ВХ}$  — температура натрия на входе активной зоны;  $k_T$  — изотермический коэффициент реактивности;  $\rho_G$  — расходный эффект реактивности натрия;  $\rho_\beta = k_\beta(B - B_0)$  — эффект реактивности, связанный с энергонаработкой (выгорание топлива);  $k_\beta$  — коэффициент реактивности, связанный с энергонаработкой;  $B$  — энергонаработка;  $\rho_x$  — прочие эффекты реактивности (не поддающиеся точной численной оценке).

Нижний индекс «0» означает базовые значения параметров, соответствующих исходному состоянию реактора на начало анализируемого периода. Уравнение (1) выражает баланс реактивности реактора нулевой мощности и может быть использовано для описания запаса реактивности от цикла к циклу в процессе всего периода работы реактора.

Для реактора на мощности в уравнение баланса реактивности (1) в квазистационарном приближении добавляются компоненты быстрой и медленной мощностной обратной связи ( $\rho_P$  и  $\rho_M$ ):

$$\rho_{СУЗ} + \rho_T + \rho_G + \rho_\beta + \rho_P + \rho_M + \rho_x = 0, \quad (2)$$

где  $\rho_P = k_P(P - P_0)$ ,  $k_P$  — эффект и коэффициент передачи быстрой мощностной связи соответственно;  $\rho_M$  — эффект медленной мощностной обратной связи. В отличие от уравнения (1) нижний индекс «0» в уравнении (2) меняет свой смысл и означает опорные значения параметров в состоянии импульсной критичности данного цикла. Уравнение (2) можно использовать для исследования хода реактивности в отдельном реакторном цикле.

Обычно расход натрия в цикле колеблется относительно среднего значения в небольших пределах ( $< 4\%$ ). Эти колебания создают случайный равномерный шум реактивности, поэтому в уравнении (2) с достаточной точностью расходом эффектом реактивности можно пренебречь.

Коэффициент энергонаработки можно вычислить по формуле, представленной в работе [5]:

$$k_3 = k_B + \frac{a}{T_1} \exp(-B/T_1) + b \exp(-B/T_2) \left[ \left(1 - \frac{B}{T_2}\right) ((B-c)^2 - d) + 2B(B-c) \right],$$

где  $k_B = -4.2975 \cdot 10^{-5} \%$ /МВт · ч,  $T_1 = 11823$  МВт · ч,  $T_2 = 6274$  МВт · ч,  $a = 0,7023\%$ ,  $b = 3,429 \cdot 10^{-13} \%$ ,  $c = 1,8489 \cdot 10^4$ ,  $d = 1,1057 \cdot 10^8$  и  $B$  — энергонаработка в МВт · ч.

Коэффициент передачи быстрой обратной связи  $k_P$ , слабо зависит от мощности и, как показывают исследования, по абсолютной величине сложным образом уменьшается с энергонаработкой [1]. Поэтому в уравнении баланса реактивности каждому циклу соответствует свой коэффициент передачи. Например, в октябре–декабре 2006 г. и в июле 1995 г. коэффициент передачи быстрой обратной связи равнялся  $-0,032 \%$ /МВт и  $-0,08 \%$ /МВт соответственно.

Изотермический коэффициент реактивности, измеренный в октябре 2006 г.,  $-2,598 \cdot 10^{-3} \%$ /°C несколько отличается от его значения, полученного во время энергетического пуска ИБР-2,  $-2,165 \cdot 10^{-3} \%$ . Это означает, что с течением времени изотермический коэффициент, хотя и очень медленно, меняется. Соответственно, для корректного описания долговременных процессов, порядка десяти и более лет изменение изотермического коэффициента также должно учитываться в балансе реактивности.

Таким образом, кроме параметров, описывающих медленные процессы, в уравнении (2) известны практически все коэффициенты, необходимые для оценки наиболее существенных эффектов реактивности. Тогда полную мощностную обратную связь ( $\rho_{\text{МОС}} = \rho_P + \rho_M$ ) можно представить в виде

$$\rho_{\text{МОС}} = - \sum_{i=1}^4 [k_i(z_i) - k_i(z_{0i})] - k_T(T_{\text{вх}} - T_{\text{вх}0}) - k_B(B - B_0). \quad (3)$$

Для параметров, входящих в выражение (3), использовались показания штатных приборов контроля и регулирования реактора: расход натрия в двух петлях первого контура, температура натрия на входе и выходе из активной зоны, положение органов регулирования и значение тепловой мощности. Энергонаработка определялась интегрированием кривой мощности. Период опроса всех указанных выше параметров составлял один час.

## 2. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОЩНОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ, УЧИТЫВАЮЩАЯ МЕДЛЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ РЕАКТИВНОСТИ

Универсальная модель мощностной обратной связи должна включать в себя как быстрые, так и медленные эффекты реактивности. Для определения вида модели полной мощностной обратной связи на рис. 1 в качестве примера приведено изменение полного мощностного эффекта реактивности, вычисленного из соотношения (3) для июльского 1995 г. цикла работы реактора. Из рис. 1 видно, что при подъеме мощности в начале цикла реактивность резко уменьшается за счет отрицательного эффекта быстрой мощностной связи. Сравнительно быстрое увеличение реактивности с постоянной времени несколько часов, наблюдаемое после подъема мощности, можно описать

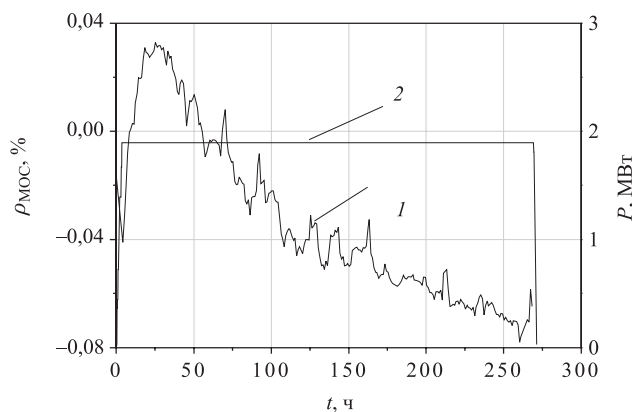


Рис. 1. Реактивность мощностной обратной связи в июльском цикле 1995 г. (1 — реактивность, 2 — мощность)

инерционным звеном с положительным коэффициентом передачи. Примерно через день начинается умеренное уменьшение реактивности с постоянной времени около восьмидесяти часов. Это уменьшение может быть описано вторым инерционным звеном с отрицательным коэффициентом передачи. Таким образом, медленная мощностная связь может быть представлена двумя инерционными звеньями. При рассмотрении всей совокупности 179 реакторных циклов как без сбросов мощности, так со сбросами (один, два, а иногда три и более сбросов за цикл) необходимо было принять, что для каждого медленного инерционного звена существуют две постоянных времени — нарастания и убывания, т. е. медленный процесс изменения реактивности не описывается линейной моделью. Анализ показывает, что основное влияние на медленное изменение реактивности оказывает тепловое поведение стационарных отра-

жателей, а также тепловой и биологической защиты. Обычно нелинейность теплового процесса тем сильнее, чем сложнее геометрия тела, чем больше его размеры и чем хуже теплопроводность материала. Особенно наглядно это выражается в различии скоростей нагрева и охлаждения. Недостаток линейной модели во многом компенсируется введением так называемой квазилинейной модели — инерционного звена с двумя постоянными времени.

Полную модель мощностной обратной связи можно представить как сумму быстрого и медленного эффектов реактивности (см. рис. 2). При рассмотрении медленных эффектов длительностью более суток блок динамики быстрой обратной связи можно считать пропорциональным звеном с одним параметром — коэффициентом передачи. Блок медленной мощностной связи может быть представлен двумя инерционными звеньями, каждое из которых характеризуется тремя параметрами: коэффициентом передачи ( $k_i$ ) и постоянными времени нарастания ( $T_{up_i}$ ) и убывания ( $T_{dni}$ ). Критерий переключения между двумя постоянными времени следующий: если выполняется условие  $k_i \cdot x(t) > y(t)$ , где  $x(t), y(t)$  — входной и выходной сигналы соответственно, то выходная величина возрастает и используется постоянная времени нарастания, в противном случае — наоборот (при  $k_i \cdot x(t) = y(t)$  система находится в равновесии).

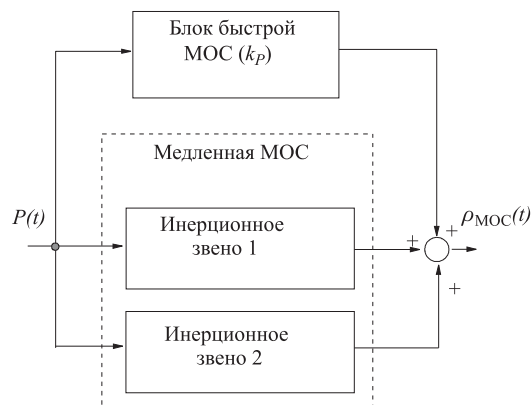


Рис. 2. Динамическая модель полной мощностной обратной связи

С использованием предложенной модели динамики можно получить изменение реактивности при любой форме изменения мощности и для любого реакторного цикла, включая циклы со сбросами мощности. Отметим, что модель не описывает быстрые процессы длительностью менее нескольких минут.

### 3. ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИКИ МЕДЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

Вопрос практического использования модели мощностной обратной связи, включающей описание медленных процессов, заключается в точности определения семи параметров модели. Поскольку данные о состоянии реактора регистрировались с достаточно большими интервалами времени (один час), принципиально невозможно было по этим данным определить коэффициент передачи быстрой связи, поэтому использовались полученные ранее данные. Некоторые из коэффициентов быстрой мощностной обратной связи были взяты из работ [1, 2, 6]. Параметры медленной связи определялись по кривой изменения реактивности для каждого реакторного цикла (см., например, рис. 1). Целевая функция представляла собой сумму квадратов разности реальных значений реактивности, оцененных из уравнения (2) и полученных из динамической модели для реального хода изменения мощности. Параметры динамики фиксировались, когда значение целевой функции становилось минимальным. Поскольку изменение реактивности в цикле включает также и шумовую компоненту, необходимо было исключить возможность выхода целевой функции на локальный минимум. Для устранения влияния шумов на процесс минимизации использовался фильтр низких частот [7], с помощью которого кривая реактивности предварительно сглаживалась. Для того чтобы принципиально важные «пики», образуемые при сбросах или резком изменении мощности, не искажались, применялась фильтрация по отрезкам. В процессе предварительной обработки устранялись практически все шумы реактивности. Для примера, на рис. 3, *a* показаны отфильтрованная кривая реактивности (исходная кривая представлена на рис. 1) и соответствующая ей кривая, полученная из динамической модели. В качестве примера в таблице приведены параметры динамики, вычисленные для некоторых реакторных циклов. Поскольку постоянные времени убывания для циклов без сброса мощности не имеют смысла, в таблице они не приведены. На рис. 3, *a* в начальном процессе подъема мощности модельная кривая описывает глубокий отрицательный пик реактивности, не зарегистрированный экспериментально из-за низкой частоты опроса, но принципиально существующий. Из этого факта можно сделать вывод, что предлагаемая модель полной мощностной связи достаточно хорошо описывает реальный процесс изменения реактивности.

Рассмотрим теперь применение модели для циклов с одним или несколькими сбросами мощности. На рис. 3, *b–г* показаны кривые реактивности, полученные экспериментально из соотношения (3) и из модели динамики для нескольких последних циклов работы реактора (октябрь–декабрь 2006 г). Из результатов обработки видно, что даже для достаточно сложного хода изменения мощности (при наличии двух или трех сбросов мощности в цикле) предлагаемая модель динамики дает удовлетворительные результаты.



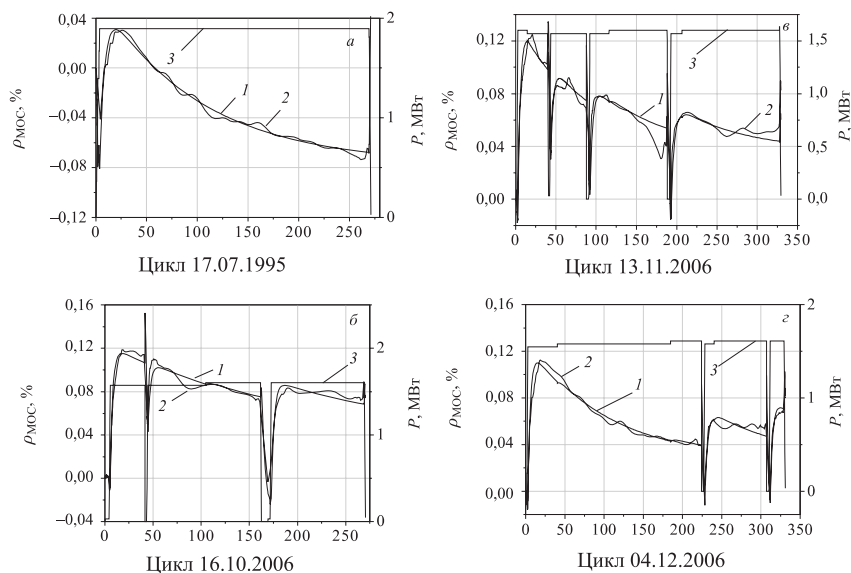


Рис. 3. Моделирование изменения реактивности в некоторых циклах работы реактора без сброса, с одним, двумя и тремя сбросами мощности. 1 — аппроксимированная, 2 — измеренная кривые реактивности, 3 — мощность

**Параметры динамики для нескольких циклов работы реактора:  $k$ ,  $T_{дн}$ ,  $T_{ур}$  — коэффициент и постоянные времени медленной обратной связи**

Дата	Сброс	Инерционное звено 1			Инерционное звено 2		
		$k$ , %/МВт	$T_{ур}$ , ч	$T_{дн}/T_{ур}$	$k$ , %/МВт	$T_{ур}$ , ч	$T_{дн}/T_{ур}$
17.07.1995	Нет	0,1085	4,576	—	-0,0719	99,44	—
16.10.2006	Да	0,1102	2,229	1,512	-0,05609	189,2	0,1318
13.11.2006	Да	0,1155	2,739	1,357	-0,06084	86,91	0,1598
04.12.2006	Да	0,1136	2,733	0,957	-0,06423	100,5	0,0608

Как видно из рис. 3, при ступенчатом уменьшении или полном сбросе мощности возникает острый положительный пик реактивности. Это явление обусловлено быстрым отрицательным мощностным коэффициентом реактивности. При сбросе мощности понятие баланса реактивности не существует (реактор не находится в критическом состоянии), поэтому экспериментальным путем получить реальную кривую изменения реактивности невозможно. Этот процесс можно только предвидеть и описать путем моделирования.

Из таблицы видно, что для трех последних циклов параметры динамики практически равны за исключением постоянной времени нарастания второго инерционного звена. Кроме того, нужно отметить, что разница между постоянными времени нарастания и убывания второго звена достаточно велика, но практически незаметна в первом звене. Это связано с жесткой нелинейностью температурного процесса в тепловой и бетонной защите реактора. Относительно большие размеры бетонной защиты, ее сложная форма и плохая теплопроводность допускают возможность нелинейных процессов динамики. По этой же причине тепловой процесс в стационарных отражателях, описываемый первым инерционным звеном, сравнительно близок к линейному и, соответственно, разница между постоянными времени нарастания и убывания невелика. В циклах без сбросов и со сбросами мощности параметры динамики существенно не различаются за исключением постоянной времени первого инерционного звена. Для выяснения причины этого явления необходимо более детальное рассмотрение всех циклов работы реактора.

## ВЫВОДЫ

Для изучения медленных процессов изменения реактивности реактора ИБР-2 длительностью более одного часа построена полная модель динамики, в которой быстрые процессы длительностью менее минуты не рассматриваются.

Динамическая модель полной мощностной обратной связи включает в себя три компонента: безынерционное звено, сравнительно медленное инерционное звено с положительным коэффициентом передачи и более медленное инерционное звено с отрицательным коэффициентом передачи.

У каждого медленного инерционного звена есть две постоянных времени (нарастания и убывания), которые отражают нелинейность температурных процессов динамики в стационарных отражателях, тепловой и бетонной защите реактора.

Использование предложенной модели мощностной обратной связи позволяет достаточно точно описать процесс изменения реактивности в любых реакторных циклах со сбросами или без сбросов мощности.

Часть параметров, описывающих медленные процессы изменения реактивности, существенно различается от цикла к циклу. Для изучения причины этого явления необходимы дальнейшие исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Оценка параметров мощностной обратной связи и устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при различных уровнях средней мощности. Сообщение ОИЯИ Р13-2006-101. Дубна, 2006.
2. *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.
3. *Попов А. К.* Анализ длительного колебательного переходного процесса мощности импульсного реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-97-361. Дубна, 1997.
4. *Ананьев В. Д. и др.* Изучение эффектов реактивности в реакторе ИБР-2 методом баланса. Препринт ОИЯИ Р13-85-339. Дубна, 1985.
5. *Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д.* Изменение эффекта реактивности реактора ИБР-2, связанного с выгоранием топлива, в период с 1982 по 2006 г. Сообщение ОИЯИ Р13-2007-144. Дубна, 2007.
6. Отчет по обоснованию безопасности исследовательского импульсного реактора ИБР-2, ОИЯИ, ЛНФ, 2000 г.
7. *Lyons Richard G.* Understanding Digital Signal Processing, Prentice Hall PTR Pub., 2001. P. 184–191.

Получено 11 октября 2007 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 8.11.2007.

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

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,93. Тираж 305 экз. Заказ № 55954.

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/)